

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

COMME EXIGENCE PARTIELLE
À L' OBTENTION DE LA
MAÎTRISE EN GÉNIE DE LA PRODUCTION AUTOMATISÉE

M.Ing.

PAR
MOKHTAR MECHTI

RECONFIGURATION DES LOIS DE COMMANDE
EN PRÉSENCE DE DÉFAUTS CRITIQUES

MONTREAL, LE 18 MAI 2005

(c) droits réservés de Mokhtar Mehti

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ
PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

Abou Seraphin-Chally, directeur de mémoire
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

Thien-My Dao, codirecteur de mémoire
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

Kenné Jean-Pierre, président du jury
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

Saad Maarouf, membre du jury
Département de génie électrique à l'École de technologie supérieure

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC
LE 27 AVRIL 2005
À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

RECONFIGURATION DES LOIS DE COMMANDE EN PRÉSENCE DE DÉFAUTS CRITIQUES

MOKHTAR MECHTI

RÉSUMÉ

L'utilisation des systèmes hydrauliques (ou à fluide sous pression) a été et reste encore le meilleur choix dans de nombreuses applications industrielles qui requièrent une grande puissance et surtout une bonne précision. La commande classique a toujours eu pour but la stabilité du système en boucle fermée et l'atteinte des performances pré-définies (point de consignes, temps de réponse, dépassement, etc.). Par contre, le problème de la sûreté du système et de l'installation à laquelle ce dernier appartient a toujours été assuré par des systèmes de sécurité indépendants (shutdown system).

L'introduction de la supervision et du diagnostic est devenue une nécessité absolue dans le but de garantir la sûreté en premier lieu mais aussi faire en sorte de maintenir le système en fonctionnement même en présence de défauts. Les algorithmes d'adaptations qui permettent de réajuster en ligne les paramètres du contrôleur ont permis de corriger des situations de défauts de faibles amplitudes ou encore de bruits additifs sur le système. Malheureusement, ces derniers ne peuvent garantir la stabilité des systèmes ni leur sécurité pour des défauts critiques (sévères).

Notre étude, examine le comportement du système en cas de défauts critiques et veut apporter une solution qui a pour objectif la reconfiguration d'une loi de commande tolérante aux fautes, qui fera en sorte d'assurer la conduite du système sous défauts tant que la sécurité n'est pas en jeu; mais aussi de permettre une prédiction du comportement à travers un diagnostic révélateur de déviations dans le système (ou écarts)

La reconfiguration des lois de commande reste un domaine vaste et l'objectif ainsi que les performances souhaitées conditionneront les approches que nous voulons appliquer à tous les systèmes automatisés.

RECONFIGURATION DES LOIS DE COMMANDE EN PRÉSENCE DE DÉFAUTS CRITIQUES

MOKHTAR MECHTI

SOMMAIRE

L'utilisation des systèmes hydrauliques (ou à fluide sous pression) a été et reste encore le meilleur choix dans de nombreuses applications industrielles qui requièrent une grande puissance et surtout une bonne précision. La commande classique a toujours eu pour but la stabilité du système en boucle fermée et l'atteinte des performances prédéfinies (point de consignes, temps de réponse, dépassement, etc.). Par contre, le problème de la sûreté du système et de l'installation à laquelle ce dernier appartient a toujours été assuré par des systèmes de sécurité indépendants (shutdown system).

L'introduction de la supervision et du diagnostic est devenue une nécessité absolue dans le but de garantir la sûreté en premier lieu mais aussi faire en sorte de maintenir le système en fonctionnement même en présence de défauts. Les algorithmes d'adaptations qui permettent de réajuster en ligne les paramètres du contrôleur ont permis de corriger des situations de défauts de faibles amplitudes ou encore de bruits additifs sur le système. Malheureusement, ces derniers ne peuvent garantir la stabilité des systèmes ni leur sécurité pour des défauts critiques (sévéres).

Notre étude, examine le comportement du système en cas de défauts critiques et veut apporter une solution qui a pour objectif la reconfiguration d'une loi de commande tolérante aux fautes, qui fera en sorte d'assurer la conduite du système sous défauts tant que la sécurité n'est pas en jeu; mais aussi de permettre une prédiction du comportement à travers un diagnostic révélateur de déviations (ou écarts) dans le système.

Un observateur d'états et un test séquentiel que nous avons conçu nous permettent successivement la détection de défauts et leur diagnostic, afin d'arriver à une décision pour la reconfiguration de la loi de commande existante (nominale). Une modification des paramètres du PID s'est avérée satisfaisante pour notre système hydraulique à l'exception de quelques cas où la gravité du défaut nous a obligé à modifier les consignes malgré la dégradation des performances (fonctionnement en mode dégradé).

La reconfiguration des lois de commande reste un domaine vaste et l'objectif ainsi que les performances souhaitées conditionneront les approches que nous voulons appliquer à tous les systèmes automatisés.

SYSTEM CONTROLS RECONFIGURATION IN PRESENCE OF CRITICAL FAILURES

MOKHTAR MECHTI

ABSTRACT

Electro-hydraulic systems are developed and widely used in industry essentially due to their large variety of implementation. These systems remain the best choice in use for many industrial applications which require great power and especially high precision. However, systems safety problem and the installation to which they belong was always driven by independent safety structure (emergency shutdown system).

There are several types of faults, which can occur in a hydraulic system such as: incorrect supply pressure, change in hydraulic compliance (viscous friction for example) and external (across the cylinder seal and lines) and internal (the wear of the piston) leakages in the cylinder. Since, it is of great importance to have an efficient operation of systems, it is necessary to have a condition monitoring and fault detection and diagnosis scheme to detect a fault as it occurs.

Many researchers have introduced supervision and diagnosis techniques with an aim of guaranteeing safety and maintaining the system under operation even in the presence of defects. They make it possible through adaptive algorithms which, on line, readjust the controller parameters in order to correct defects of low amplitudes or of additive noises on the system. Unfortunately, adaptive methods cannot guarantee systems stability nor their safety for critical defects cases. Now, there is time for more innovative approach to come over these weaknesses.

Our study examines the behavior of the system in the event of critical defects and brings solutions which aim at the control law reconfiguration that takes into account systems faults-tolerance capabilities. This is to guarantee a correct behavior (even in presence of given amount of hardware faults and software errors) as long as safety is not affected. A non-linear state observer and a sequential test of Wald are conceived to generate and evaluate residuals in order to make a decision for the control law reconfiguration. Simulation of the developed techniques, where parameters of the PID controller have been modified, proved to be satisfactory. However, for some severe defaults, system inputs were modified to provide gracefully degradable performances (operation in degraded mode).

Suggestions and solutions to design a fault-tolerant control system based on control law reconfiguration for specific application can be derived from the developed approach and the presented results in this study. Further research should improve the efficiency of other approaches in the operating system for dynamic reallocation.

REMERCIEMENTS

Tout au long du déroulement de ce mémoire, de nombreuses personnes ont contribué d'une façon ou d'une autre, de près ou de loin, à sa réussite. J'aimerais tout d'abord remercier particulièrement mon directeur de recherche, le professeur Abou Seraphin-Chally pour sa collaboration, son dévouement et ses précieux conseils, son soutien moral et financier. Je n'oublierai pas mon co-directeur le professeur Thien-My Dao pour son soutien moral et financier et ses directives de par son expérience dans la recherche.

J'aimerais remercier également tous mes collègues de l'école de technologie supérieure pour leur encouragement et un merci particulier au personnel du département de génie mécanique. Un grand merci à l'association des professeurs de l'école de technologie supérieure qui m'a soutenu financièrement à travers une bourse d'études que j'ai grandement appréciée.

Finalement, je ne saurai trouver les mots appropriés pour remercier ma chère épouse Assia qui m'a soutenu et supporté tout au long de mon projet, à mon fils Rayan, à mes sœurs Wahiba et Nawal et les êtres chères, qui malgré l'éloignement n'ont pas cessé de m'encourager, mes chers parents, mes frères et mes sœurs.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
SOMMAIRE	ii
ABSTRACT	iii
REMERCIEMENTS.....	v
TABLE DES MATIÈRES.....	vi
LISTE DES FIGURES	viii
LISTE DES ABRÉVIATIONS ET DES SIGLES	x
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 INTRODUCTION AU SYSTEME HYDRAULIQUE	10
1.1 Analyse fonctionnelle du système	10
1.2 Modélisation du système hydraulique.....	13
1.2.1 Modélisation de la servovalve.....	14
1.2.2 Modélisation des canalisations.....	15
1.2.3 Modélisation du vérin (ou de l'actionneur).....	15
1.2.4 Ecriture du modèle d'états.....	16
1.3 Simulation du modèle en boucle ouverte	17
1.4 Conclusion	21
CHAPITRE 2 OBSERVATEURS D'ÉTATS.....	22
2.1 Principe	22
2.2 Applications.....	24
2.3 Observabilité des systèmes linéaires	25
2.3.1 Notion d'observabilité	25
2.3.2 Détermination de la matrice de gain	27
2.4 Observateurs d'états des systèmes non linéaires.....	27
2.5 Conception de l'observateur non-linéaire	30
2.5.1 Résultats compilés pour le design de l'observateur non-linéaire	34
2.5.2 Analyse de la stabilité et de la sensibilité de l'observateur	36
2.5.2.1 Analyse de l'observateur en mode normal (sans défaut).....	37
2.5.2.2 Défaut de la pression d'alimentation.....	40
2.5.2.3 Défaut de frottement visqueux	43
2.5.2.4 Défaut du module de compressibilité.....	46
2.5.2.5 Défauts d'usure géométrique (au niveau des chambres) du vérin	49
2.5.3 Conclusion	51

CHAPITRE 3	DETECTION ET DIAGNOSTIC DE DEFAUTS.....	53
3.1	Description des différents types de défauts.....	54
3.2	Principe de la détection	55
3.3	Les méthodes de détection et diagnostic	57
3.3.1	Modèles fondés sur le traitement de données	58
3.3.2	Outils fondés sur les modèles quantitatifs.....	59
3.3.3	Outils fondés sur les modèles qualitatifs.....	60
3.4	Application de la méthode choisie	61
3.5	Les tests séquentiels de Wald.....	62
3.5.1	Principe du test séquentiel de Wald	65
3.5.2	Résultats de la simulation du test de Wald sur le système.....	67
3.6	Conclusion	71
CHAPITRE 4	ACCOMMODATION AUX DÉFAUTS ET RECONFIGURATION DES LOIS DE COMMANDE	72
4.1	Introduction	72
4.2	Principe.....	73
4.3	L'objectif d'une accommodation	75
4.4	Classification des stratégies d'accommodation	76
4.5	Les méthodes d'accommodation.....	77
4.5.1	Méthodes heuristiques	78
4.5.2	Méthodes analytiques	79
4.5.2.1	Accommodation par stabilisation simultanée	79
4.5.2.2	Méthode de la pseudo-inverse (PIM).....	80
4.5.2.3	Accommodation par commande adaptative	82
4.5.2.4	Accommodation par placement de pôles adaptatif	83
4.5.2.5	Accommodation par des techniques multi-modèles	84
4.6	Les limitations de l'accommodation aux défauts.....	87
4.7	Elaboration de la reconfiguration de la loi de commande par la méthode heuristique	88
4.7.1	Evaluation des performances du système	90
4.7.2	Mémorisation des paramètres nouvellement calculés.....	91
4.7.3	Réactualisation (reconfiguration) de la loi de commande	94
4.8	Conclusion	97
CONCLUSION GÉNÉRALE		99
RECOMMANDATIONS		101
ANNEXE		102
BIBLIOGRAPHIE.....		110

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1	Exemple de circuit hydraulique..... 11
Figure 2	Banc d'essai théorique..... 13
Figure 3	Schéma de simulation sur Simulink 19
Figure 4	Allures de la vitesse y et du déplacement de la servovalve x_{sp} 20
Figure 5	Allures des pressions P_i et P_o 20
Figure 6	Allures de la commande u et du déplacement x_{sp} 21
Figure 7	Observateur d'états..... 23
Figure 8	Représentation du système non linéaire..... 28
Figure 9	Schéma complet modèle-observateur..... 30
Figure 10	Évolution des états réels et estimés 37
Figure 11	Évolution des pressions P_i et P_o 38
Figure 12	Erreur de poursuite (en mode normal) 39
Figure 13	Erreur de poursuite P_i et P_o (en mode normal)..... 39
Figure 14	Effets de la variation de pression d'alimentation P_s 41
Figure 15	Évolution des pressions P_i et P_o réels et estimés..... 41
Figure 16	Erreur de poursuite (défaut de pression P_s)..... 42
Figure 17	Erreur de poursuite P_i et P_o (défaut de pression P_s) 43
Figure 18	Effets du frottement..... 44
Figure 19	Évolution des pressions P_i et P_o 44
Figure 20	Erreur de poursuite (Défaut de frottement)..... 45
Figure 21	Erreur de poursuite P_i et P_o (Défaut de frottement) 45
Figure 22	Effets du coefficient β_M 47
Figure 23	Évolution des pressions P_i et P_o 47

Figure 24	Erreur de poursuite (Défaut de β_M)	48
Figure 25	Erreur de poursuite (Défaut de β_M)	48
Figure 26	Effets de l'usure des chambres du vérin	49
Figure 27	Évolution des pressions P_i et P_o	50
Figure 28	Erreur de poursuite	50
Figure 29	Erreur de poursuite P_i et P_o	51
Figure 30	Les méthodes de détection	57
Figure 31	Erreurs de décision α et β	64
Figure 32	Zones de décision	66
Figure 33	Test en mode normal	67
Figure 34	Exemple de bruit gaussien.....	68
Figure 35	Détection d'un bruit en sortie.....	68
Figure 36	Détection de défaut de frottement	69
Figure 37	Détection de défaut de pression P_s	70
Figure 38	Cas de rejet	70
Figure 39	Schéma général d'une stratégie d'accommodation aux défauts	74
Figure 40	Objectif de l'accommodation	75
Figure 41	Classification des stratégies d'accommodation	77
Figure 42	Principe de la stabilisation simultanée	80
Figure 43	Architecture de la commande par multi-modèles	85
Figure 44	Limite de reconfiguration.....	87
Figure 45	Réponse du système en mode normal	91
Figure 46	Adaptation du PID dans le cas de perte de pression	92
Figure 47	Évolution du test de Wald (perte de pression)	93
Figure 48	Adaptation du PID (défaut de frottement)	93
Figure 49	Évolution du test de Wald (défaut de frottement).....	94
Figure 50	Seuils d'aide à la décision	95
Figure 51	Cas de changement de consigne.....	97

LISTE DES ABRÉVIATIONS ET DES SIGLES

A_i	Surface de la chambre du vérin, m^2
A_o	Surface de la chambre du vérin, m^2
β_M	Facteur de compressibilité du fluide, Pa
C_d	Coefficient de décharge
F	Force de déplacement, N
f_d	Coefficient de frottement visqueux
K_{sp}	Gain de la servovalve, m/A
m	Masse, Kg
P_i	Pression côté chambre, Pa
P_o	Pression côté chambre, Pa
P_r	Pression de retour vers réservoir, Pa
P_s	Pression d'alimentation, Pa
Q_i	Débit d'entrée, m^3/s
Q_o	Débit de sortie, m^3/s
τ	Constante de temps, s
u	Entrée de commande
V_i	Volume à l'entrée du vérin, m^3
V_o	Volume à la sortie du vérin, m^3
w	Aire d'orifice de la servovalve, m^2
x_{sp}	Déplacement de la servovalve, m
Y	Déplacement du vérin, m
\dot{Y}	Vitesse du vérin, m/s
\ddot{Y}	Accélération du vérin, m/s^2
SISO	single input, single output (une entrée, une sortie)

t	Temps, s
x_0	État initial
x	Variable d'état
\hat{x}	État estimé
K_e	Matrice de gain de l'observateur
e	Erreur de sortie
P	Matrice définie positive
γ	Constante de Lipschitz
$\lambda(.)$	Valeurs propres de la matrice $(.)$
Q	Matrice de pondération définie positive
K_1, K_2, K_3, K_4	Eléments de la matrice de gain K_e
Mpa	Méga Pascal
Pa	Pascal
β	Probabilité du manque à la détection
α	Probabilité du taux de fausses alarmes
K_p	Gain de l'action proportionnelle
T_i	Constante de temps intégrale
T_d	Constante de temps dérivée
H_0	Hypothèse de fonctionnement normal
H_1	Hypothèse de fonctionnement en défaut
A_N	Droite d'acceptance
R_N	Droite de rejection
σ	Ecart type
μ	Moyenne
θ_0 et θ_1	Moyennes d'erreurs
D_0 et D_1	Domaines de décision pour l'hypothèse H_0 et H_1

INTRODUCTION

1 Généralités

Les systèmes électrohydrauliques regroupent l'ensemble des activités relatives aux systèmes ou composants utilisant un fluide (hydraulique, pneumatique, eau) sous pression comme support de l'énergie. De par la puissance que ces systèmes génèrent, ils constituent un moyen de motorisation très performante dans une grande variété d'utilisations industrielles, par exemple la suspension active des véhicules, les presses à injecter, l'aéronautique, les machines à outils, etc.

Pour utiliser au mieux la potentialité de ces composants, et donc d'améliorer les performances des installations hydrauliques, le besoin des contrôles électrohydrauliques se fait de plus en plus sentir. Ces développements font alors appel:

- Au calcul d'une loi de commande,
- À la modélisation et simulation d'un système électrohydraulique,
- À la validation d'une loi de commande et l'évaluation des performances,
- À la sûreté de fonctionnement du système.

La sûreté qui est un élément indispensable dans une installation industrielle, nous amène à considérer quelques paramètres indissociables de la partie automatisation et comportent:

La surveillance qui se réfère à la capacité de reconnaître un comportement anormal du système et sa signalisation,

La supervision qui est fondée sur la surveillance et la capacité d'agir, dans le but d'éviter des dommages sur l'installation et surtout de continuer la production à «*moindre mal*».

Le système hydraulique qui fait l'objet de notre étude, est largement répandu dans l'industrie. Actuellement, les méthodes employées pour l'automatisation des systèmes hydrauliques sont de plus en plus sophistiquées avec une complexité croissante. Cela s'explique par le besoin de systèmes plus performants, sûrs et fiables. Ce sont des systèmes pour lesquels une fausse manœuvre peut coûter très chère, notamment des vies humaines. Citons par exemple, les réacteurs nucléaires, les installations de produits chimiques, les systèmes aéronautiques, etc.

Un concept très recherché de nos jours est *l'automatisation intégrée*. Ce concept ne s'attache pas seulement au maintien de quelques variables du procédé et à des valeurs de référence, mais aussi s'intéresse plutôt au procédé dans sa globalité, et surtout dans ses divers modes de fonctionnement. On distingue en général les modes de fonctionnement normal, les modes de démarrage et d'arrêts, qui sont évidemment pris en considération au moment de la conception du système de commande.

Ces modes particuliers peuvent nécessiter soit l'arrêt immédiat de l'installation (arrêt d'urgence), soit la bascule de la commande vers un mode de repli ou dégradé. Dans ces cas, les consignes des boucles locales risquent d'être modifiées ou même on peut carrément reconstituer l'architecture de la commande ou du procédé. Pour assurer la sûreté de fonctionnement des installations, la description des systèmes, les connaissances du domaine qui modélisent l'expertise, les connaissances de contrôle sont mises à contribution pour résoudre les problèmes dans des cas critiques. C'est à partir de là que la détection et le diagnostic de défauts interviennent dans le contrôle afin de reconnaître l'état de fonctionnement du système, mais surtout de développer la capacité d'agir rapidement face au fonctionnement anormal des systèmes. L'enjeu consiste à ne pas faire référence uniquement à des lois de commande construites a priori, mais à mettre en place des systèmes extérieurs mettant en œuvre une loi de commande, parmi un ensemble de loi de commande, respectant des critères donnés. Cela conduit à la reconfiguration de la commande.

Dans cette étude nous allons nous préoccuper de la reconfiguration des lois de commande tolérantes aux fautes. Après avoir modélisé le comportement physique du système de façon à garantir une bonne détection de son dysfonctionnement, la loi de reconfiguration de la commande sera réalisée en deux étapes essentielles : la génération de résidus sensibles aux fautes et une logique de décision basée sur le degré de gravité de la faute.

2 Problématique

L'automatisation d'un processus consiste à fournir une solution quasi optimale permettant d'obtenir la meilleure qualité du produit et la meilleure performance possible. La théorie de commande de systèmes automatisés a été largement développée dans la littérature et appliquée à des systèmes industriels. Ces techniques ont toujours eu pour mission, d'assurer la stabilité du système en boucle fermée et d'atteindre des performance pré-définies dans le cas où tous les éléments constituant la boucle de régulation (capteurs, actionneurs, régulateurs et composants du système) fonctionnent normalement.

Malheureusement , plus un système est automatisé, plus il est susceptible de présenter des dysfonctionnements surtout avec les systèmes automatisés de nos jours, qui sont parfois d'une extraordinaire complexité et leur conduite, tout autant que leur maintenance, nécessite la collecte et l'analyse de nombreuses informations provenant des multiples éléments qui le constituent. Delà, une question importante que l'ingénieur se pose lors de la conception de ces systèmes : que faire lorsque un ou plusieurs composants sont momentanément défaillants ?

Si tel est le cas, une commande classique peut rendre le système instable et son principal handicap réside en l'absence d'informations sur le système. Il est donc judicieux de concevoir des méthodes de commande capables d'assurer les performances nominales dans les cas de fonctionnement normal ou en défaut afin de préserver la sûreté de fonctionnement du système. L'action à entreprendre dépend de la stratégie de commande qui permettra de limiter, voire d'éliminer l'effet des défauts sur les performances du système selon la gravité du défaut.

Un diagnostic doit être effectué afin d'établir rapidement une stratégie permettant de limiter les risques en terme de sécurité et de décision de continuation ou d'interruption du processus de production.

Divers travaux ont été menés depuis le début des années 80 concernant la localisation et la détection des défauts de capteurs [1], d'actionneurs [2] et de nombreux outils existent à cet effet [3]. Ensuite se pose la question de l'interruption du processus ou de sa continuation en mode dégradé tout en conservant les performances souhaitées. Dans ce dernier cas, le plus intéressant, deux approches sont envisageables:

Première approche : en présence de défauts de faibles amplitudes, une accommodation passive qui se fonde sur la connaissance a priori des défauts [4] et sur une structure de paramètres fixes du régulateur au cours du temps [5], permet de maintenir les performances du système. En revanche, lors de l'apparition de défauts plus sévères, il s'avère nécessaire de mettre en œuvre une procédure d'accommodation active qui utilise des techniques d'ajustement en ligne des régulateurs et un module de diagnostic.

Deuxième approche : depuis une vingtaine d'années, de nombreuses lois de commande tolérantes aux fautes se sont développées, fondées le plus souvent sur l'approche adaptative ou sur une commande non linéaire (approche par multi-modèles [6], linéarisation entrées/sorties par difféomorphisme et bouclage [7]). Tous les types de défauts y sont traités: défauts actionneurs, capteurs, système, de faibles ou fortes amplitudes. La redondance matérielle est alors couramment utilisée pour pallier les effets de défauts sévères [8].

Par contre, la synthèse d'une loi de commande reconfigurable en présence de défauts sévères sur des systèmes sans redondance matérielle, n'a pas été traitée suffisamment dans la littérature. Cela reste pourtant un enjeu de taille puisque ce type de défauts

amène le système vers une zone de fonctionnement inacceptable où les performances nominales sont impossibles à préserver.

Pour le système hydraulique étudié, la mauvaise qualité d'asservissement entraîne souvent une détérioration prématurée des équipements. D'ailleurs la sollicitation de toute pièce mobile dans le système soumise à une variation permanente plutôt que temporaire, notamment de la servovalve pilote et du servomécanisme de positionnement, entraînera l'usure prématurée. D'où l'intérêt de développer une méthode de reconfiguration des lois de commande en présence de défauts.

3 Objectif

Selon les connaissances que l'on possède sur un procédé ou encore sur un système, on peut élaborer un diagnostic capable de nous informer sur son état de fonctionnement. Dans le cadre de notre projet, cette connaissance peut être utilisée pour prendre un certain nombre de décisions de conduite en temps réel, quand elle est suffisamment précoce. Il s'agit tout d'abord de garantir la sûreté du système ainsi que la sécurité des vies humaines et de l'environnement tout autour, ensuite de limiter les pertes de ce qui est en cours de fabrication.

L'objectif général recherché dans notre étude, vise à considérer l'état du système en tout temps à travers une observation de la sortie du système, ce qui nous amène à l'évaluation du degré de défaillance avec une certaine efficacité via une détection très précoce. Nous voulons également arriver à une conduite du système sous défaut si la sécurité n'est pas en jeu ;. le plus simple serait de faire appel à une accommodation qui fera en sorte de modifier les paramètres du régulateur pré-établi pour des défauts assez minimes. Sinon dans le cas de défauts sévères, nous penserons à une reconfiguration de la loi de commande qui consisterait en une modification des consignes ou encore en faisant appel à la redondance matérielle si cela est possible ou indispensable comme dans le cas de l'aviation civile.

4 Méthodologie

Il est clair que l'accommodation est une solution qui implique des méthodes d'estimation [3], de validation de données [9] et de modélisation [10]. Nous allons chercher d'ailleurs à maintenir les performances adéquates du système en présence de défauts de faibles amplitudes, en se basant sur la connaissance à priori de ces défauts et sur une définition de la structure du régulateur au cours du temps. Mais surtout de faire la synthèse d'une loi de commande tolérante aux fautes qui englobe une commande nominale palliant les effets de perturbations et petits défauts suivie d'une accommodation active (reconfiguration) palliant les défauts sévères (critiques). Les méthodes utilisées pour résoudre le problème de l'accommodation aux défauts sont en général analytiques et basées sur le principe de la commande robuste [5] et de la commande adaptative [11-14] ou bien heuristiques [15-17].

Nous faisons face en premier lieu à un système non-linéaire que nous modélisons sans même chercher à le linéariser dans le souci de garantir une reproduction fidèle lors de la simulation du modèle établi. Nous allons ensuite concevoir un observateur non-linéaire, quoique la tâche n'est pas facile, pour la génération de résidus seuls indicateurs de l'état du système. Ces résidus sont ensuite évalués en utilisant un test séquentiel du rapport de probabilités (test séquentiel de Wald) pour la détection et le diagnostic de défauts.

La dernière étape sera la conception de la loi de commande appropriée qui fait appel à la commande robuste via une commande nominale pré-établi pour des erreurs sans grande influence sur la réponse du système tels que les bruits ou défauts de faibles amplitudes. Sinon, dans le cas contraire (défauts critiques ou sévères), une commande heuristique sera envisagée comme dernier recours, celle-ci étant basée sur des seuils de décisions pré-établies fondés sur la connaissance du comportement du système dans ses divers modes.

La stratégie de reconfiguration que nous allons établir dans le cadre de notre projet doit reposer essentiellement sur :

- Une modélisation qui se rapproche le plus possible et qui soit représentative du comportement physique de notre système hydraulique,
- Une surveillance qui se réfère à la capacité d'identifier un comportement anormal et de le signaler à travers un résidu ; ça sera le rôle d'un observateur d'états,
- Une phase de diagnostic des résidus générés qui sera à la base de nos décisions face à d'éventuels défauts,
- L'élaboration d'une loi de commande tolérante aux fautes.

Et pour terminer, il est bon de dire que le domaine d'application des lois de commandes tolérantes aux fautes reste à explorer, en raison de la diversité des techniques existantes qui reposent sur les connaissances diverses des systèmes.

CHAPITRE 1

INTRODUCTION AU SYSTEME HYDRAULIQUE

1.1 Analyse fonctionnelle du système

Les utilisations des systèmes hydrauliques sont tellement variées qu'elles concernent tous les secteurs du monde industrialisé. Ainsi, en aéronautique, on utilise exclusivement des systèmes hydrauliques dans les commandes des avions. C'est d'ailleurs grâce à l'aéronautique que, après la première guerre mondiale, on a amélioré ces systèmes en cherchant à obtenir de plus hautes pressions de fonctionnement, une réduction de l'encombrement et du poids, ainsi qu'une très grande fiabilité.

Les industries manufacturières ont profité également des systèmes hydrauliques pour réaliser l'automatisation de la production en série. Durant les deux dernières décennies et grâce à leur souplesse, on retrouve les systèmes hydrauliques dans les machines outils et plus récemment dans les robots industriels. Tout cela nous amène à donner une place capitale à notre système dans le monde industriel actuel. Ce qui se traduit aussi par les différentes études qu'on n'arrête pas de rencontrer dans la littérature de la commande.

Ces études s'intéressent particulièrement aux performances des vérins hydrauliques dans la suspension automobile [10], de même l'évaluation de la robustesse du contrôle et ça ne s'est pas arrêté à ce stade; d'ailleurs, les études récentes formulées par Patton [18] tentent à travers la détection de défauts sur les systèmes hydrauliques de garantir la continuité de leur fonctionnement dans le cas d'une défaillance de capteurs ou d'actionneurs, sans oublier les travaux de Noura [2] qui s'est penché sur les méthodes de design de contrôleurs tolérants aux fautes dues essentiellement aux composantes du système et des actionneurs.

Le modèle hydraulique le plus rencontré en industrie et qui fera l'objet de notre étude est représenté par la figure 1.

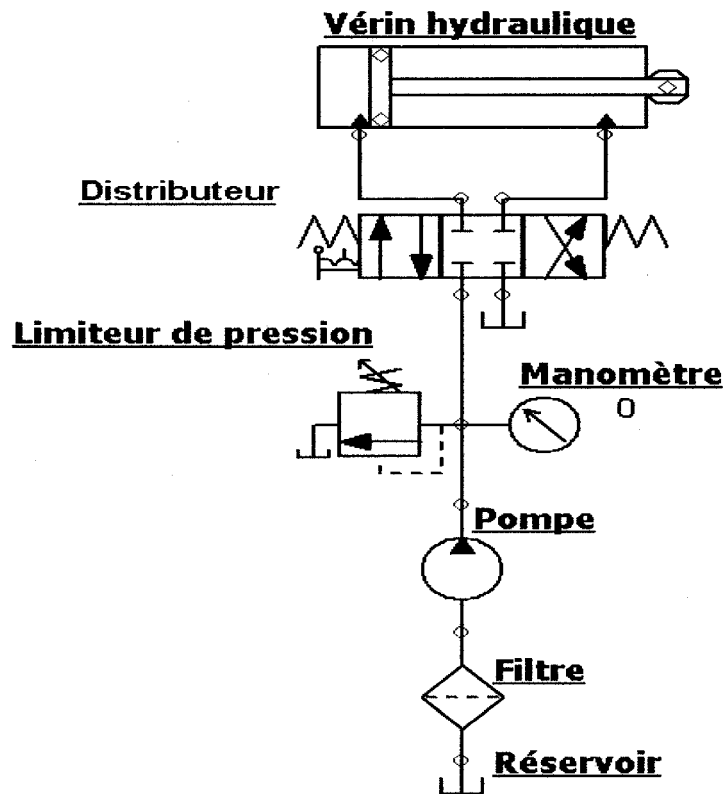


Figure 1 Exemple de circuit hydraulique

Il s'agit essentiellement, d'une servovalve, d'une canalisation et d'un actionneur (ou Vérin) qui seront donc les principales composantes de notre système. La reconstruction du comportement dynamique de ces composantes, que nous appellerons par la suite les états du système, se caractérisent par la variation de certaines variables (Position du piston, Vitesse du piston, pressions dans les chambres du vérin, ...etc.) et qui seront la clé de notre développement en vue de faire un bon contrôle et surtout notre principale préoccupation la détection et le diagnostic de défauts.

Ce modèle consiste en général en un système d'équations différentielles ordinaires portant sur l'état, ainsi que d'une équation d'observation (équation de sortie) :

$$\begin{aligned}\dot{x} &= f(x, t, u) \\ y &= h(x, t)\end{aligned}\tag{1.1}$$

où x représente le vecteur d'état, u le vecteur de commande et y le vecteur de mesure

L'objectif qu'on visera sera la conception d'une loi de commande tolérante aux défauts et qui permettra de préserver au mieux les performances souhaitées d'où l'intérêt d'une bonne modélisation du système hydraulique qu'on ne peut ignorer.

À travers cette modélisation, nous pourrons étudier la dynamique de notre système et de là suivre son comportement via un modèle équivalent connu sous le nom d'observateurs d'états qui justement nous informera de tout changement susceptible d'affecter le bon fonctionnement du système.

Les écarts découlant des valeurs des paramètres mesurées avec ceux estimées et que nous appellerons résidus seront la clé de notre diagnostic du fait qu'ils représentent des écarts de comportement liés uniquement aux défaillances et aux incertitudes sur le système et les mesures.

À noter aussi que l'utilisation d'un modèle (ou observateur) permet la surveillance dynamique en particulier pendant les changements de points de fonctionnement.

1.2 Modélisation du système hydraulique

La première étape vers l'automatisation est l'élaboration d'un modèle mathématique. Cette modélisation est très importante tant pour les objectifs de simulation que pour les objectifs de synthèse d'une loi de commande. Nous allons voir dans ce qui suit les différentes étapes pour l'élaboration du modèle.

Le modèle expérimental de notre système [19] est donné par la figure 2 suivante :

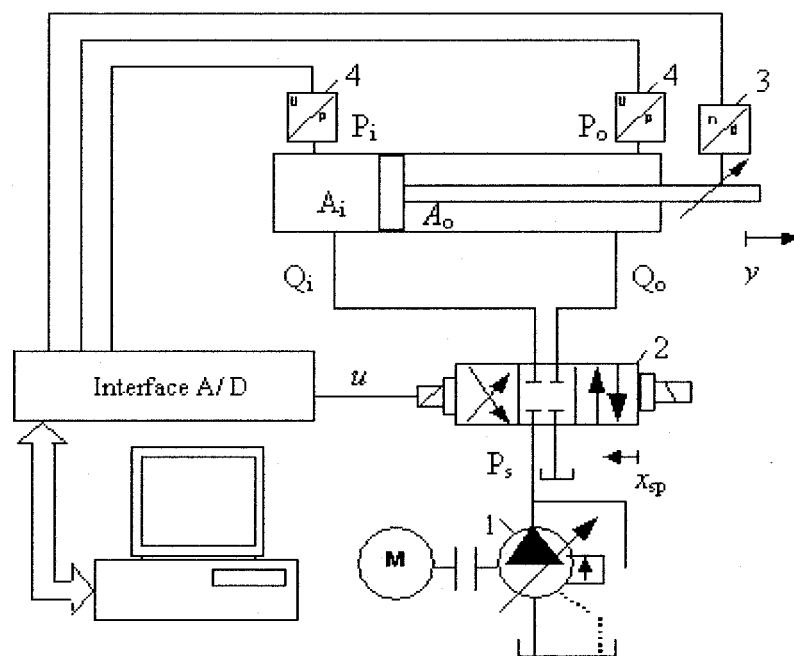


Figure 2 Banc d'essai théorique

- 1- Pompe avec réservoir et limiteur de pression,
- 2- Servovalve Proportionnel 4/2,
- 3- Encodeur incrémental,
- 4- Transmetteur de pression.

1.2.1 Modélisation de la servovalve

Le déplacement de la servovalve via ses tiroirs en mouvement, commandé par un moteur électrique, permet le contrôle des pressions de sortie et d'entrée et peut être estimé à un n ème ordre selon la dynamique du système.

Dans notre cas, nous pouvons approximer ce comportement à celui d'un premier ordre (ce qui est fréquent et vérifié dans l'industrie et plus particulièrement chez les fabricants).

En utilisant l'équation du fluide hydraulique à travers un orifice, la relation entre le déplacement de la servovalve qu'on notera x_{sp} , et l'écoulement Q de charge, basée sur l'équation de Bernoulli (pression vs débit) est donnée comme suit :

$$Q_i = \begin{cases} wC_d x_{sp} \sqrt{P_s - P_i} & x_{sp} \geq 0 \text{ (extension)} \\ wC_d x_{sp} \sqrt{P_i - P_r} & x_{sp} < 0 \text{ (retraction)} \end{cases} \quad (1.2)$$

$$Q_o = \begin{cases} wC_d x_{sp} \sqrt{P_o - P_r} & x_{sp} \geq 0 \text{ (extension)} \\ wC_d x_{sp} \sqrt{P_s - P_o} & x_{sp} < 0 \text{ (retraction)} \end{cases} \quad (1.3)$$

Où Q_i et Q_o représentent respectivement l'écoulement du fluide à l'entrée et à la sortie de la servovalve, C_d le coefficient de décharge; La combinaison w (section d'ouverture) et x_{sp} définissent l'aire d'orifice. P_s , P_r , P_i , et P_o sont la pression d'alimentation issue de la pompe, la pression de retour vers le réservoir, la pression d'entrée de ligne et la pression de sortie de ligne.

1.2.2 Modélisation des canalisations

Les canalisations sont les conduites ou tuyaux flexibles appropriés permettant de véhiculer le fluide de la servovalve vers le vérin. L'équation de continuité-débit, fondée sur le principe « rien ne se perd, rien ne se crée », sans tenir compte des fuites au niveau du circuit particulièrement au niveau du vérin (pourcentage très faible) s'écrit alors :

$$Q_i = \frac{V_i}{\beta_M} \dot{P}_i + A_i \dot{Y} \quad (1.4)$$

$$Q_o = -\frac{V_o}{\beta_M} \dot{P}_o + A_o \dot{Y} \quad (1.5)$$

Où A_i et A_o sont les surfaces des chambres du vérin, V_i et V_o les volumes emprisonnés des deux cotés du vérin, \dot{Y} la vitesse du vérin et β_M le facteur de compressibilité du fluide.

1.2.3 Modélisation du vérin (ou de l'actionneur)

Comme on l'a mentionné plus haut, le vérin permet de déplacer de façon linéaire divers mécanismes en développant une force qui agit directement sur ces derniers.

En se basant sur la loi de Newton, on peut écrire :

$$F = P_i A_i - P_o A_o = m \ddot{Y} + f_d \dot{Y} \quad (1.6)$$

Où m désigne la masse du piston, Y représente le déplacement du vérin et enfin les dérivées premières et secondes \dot{Y} , \ddot{Y} qui sont consécutivement la vitesse et

l'accélération, f_d étant le coefficient de frottement visqueux et en dernier F la force résultante.

1.2.4 Ecriture du modèle d'états

En se basant sur les équations établies précédemment (i.e 1 à 5), définissons les états du système sur lesquelles on va apporter plus d'attention et qu'on notera :

x_1 : Vitesse du Piston

x_2 : Pression d'entrée P_i

x_3 : Pression de sortie P_o

x_4 : Déplacement x_{sp}

et $y = x_1$ sera la sortie du système.

Le vecteur d'états du système sera noté : $x = [x_1, x_2, x_3, x_4]^T$

Rappelons aussi qu'il faudra, pour des raisons de simplification pour l'analyse du système, considérer les déplacements positifs du piston (vérin en extension $x_{sp} \geq 0$). Le signal de commande qu'on notera u sera appliqué à la servovalve dont la dynamique est approximée à un système de premier ordre à travers l'équation suivante :

$$\dot{x}_{sp} = \frac{1}{\tau} [K_{sp} u - x_{sp}] \quad (1.7)$$

Où τ désigne la constante de temps et K_{sp} le gain de la servovalve.

Finalement, nous pouvons établir le modèle d'états (équations 1.2 à 1.6) de notre système comme suit :

$$\dot{x}_1 = \frac{1}{m}[-f_d x_1 + x_2 A_i - x_3 A_o] \quad (1.8)$$

$$\dot{x}_2 = \frac{\beta_M}{V_i}[(c_d \omega x_4 \sqrt{p_s - x_2}) - A_i x_1] \quad (1.9)$$

$$\dot{x}_3 = \frac{\beta_M}{V_o}[A_o x_1 - c_d \omega x_4 \sqrt{x_3 - p_r}] \quad (1.10)$$

$$\dot{x}_4 = \frac{1}{\tau}[K_{sp} u - x_4] \quad (1.11)$$

ou encore sous la forme matricielle suivante :

$$\dot{x} = \begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{-f_d}{m} & \frac{A_i}{m} & \frac{-A_o}{m} & 0 \\ \frac{-\beta_M A_i}{V_i} & 0 & 0 & \frac{\beta_M}{V_i} [C_d w \sqrt{p_s - x_2}] \\ \frac{\beta_M A_o}{V_o} & 0 & 0 & \frac{-\beta_M}{V_o} [C_d w \sqrt{x_3 - p_r}] \\ 0 & 0 & 0 & \frac{-1}{\tau} \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{K_{sp}}{\tau} \end{pmatrix} * u \quad (1.12)$$

$$y = C * x \quad \text{où } C = [1, 0, 0, 0]$$

1.3 Simulation du modèle en boucle ouverte

La simulation en boucle ouverte, nous permettra d'évaluer le comportement du système hydraulique dans le temps, mais surtout de nous assurer du bon comportement de toutes

ses variables d'état. La simulation est basée sur les données réelles répertoriées dans le tableau I ci-dessous :

Tableau I
Paramètres du système hydraulique

Paramètres	Abréviations	Valeurs numériques	Unités
Frottement visqueux	f_d	1600	N.s/m ²
Masse du piston	m	20	Kg
Surface avant du vérin	A_i	114×10^{-5}	m ²
Surface arrière du vérin	A_o	63×10^{-5}	m ²
Module de compressibilité	β_M	5×10^9	Pa
Volume avant du vérin	V_i	0,015	m ³
Volume arrière du vérin	V_o	0,015	m ³
Coefficient de décharge	C_d	0,032	
Aire d'orifice de la servovalve	w	0,02	m ²
Gain de la servovalve	K_{sp}	0,00161	m/A
Constante de temps de la servovalve	τ	0,033	s
Pression d'alimentation	P_s	7687×10^3	Pa

Le schéma bloc conçu pour la simulation du système en utilisant les équations 1.8 à 1.11 sur le logiciel Simulink de Matlab est donné à la figure 3.

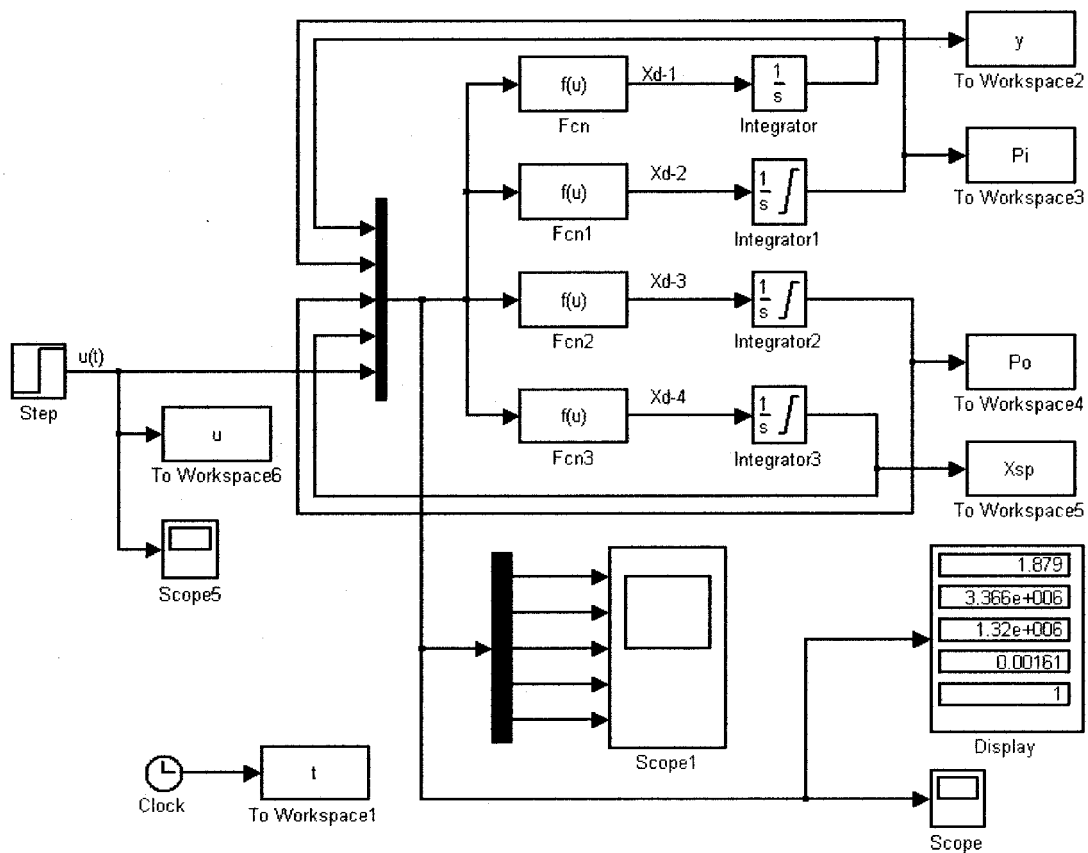


Figure 3 Schéma de simulation sur Simulink

Les résultats obtenus selon l'équation (1.12) pour une entrée de type échelon unitaire en boucle ouverte sont illustrés par les graphiques suivants :

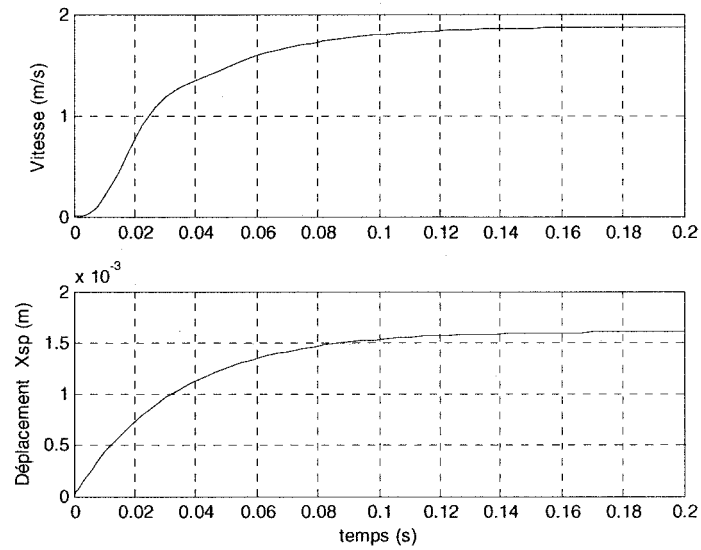


Figure 4 Allures de la vitesse y et du déplacement de la servovalve x_{sp}

Dans la figure 5, les pressions des deux chambres du vérin P_i et P_o sont aussi stables en régime permanent et leur somme n'excède pas la pression d'alimentation P_s .

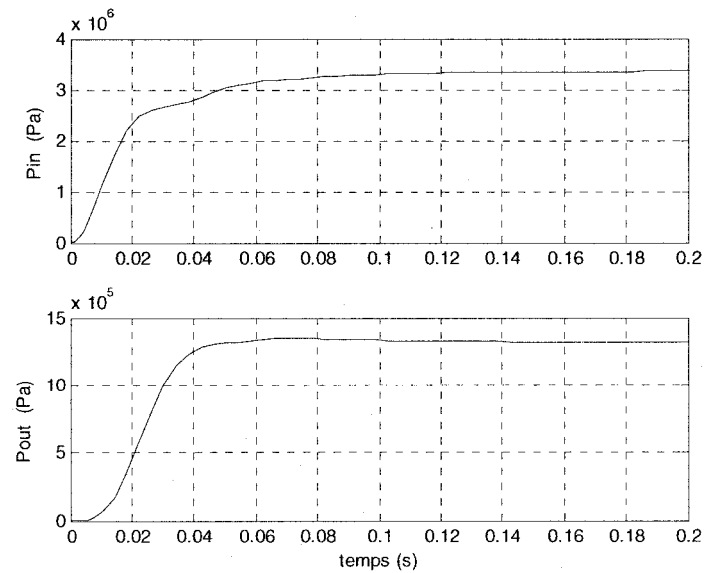


Figure 5 Allures des pressions P_i et P_o

La figure 6 confirme la réponse de premier ordre de l'ouverture de la servovalve.

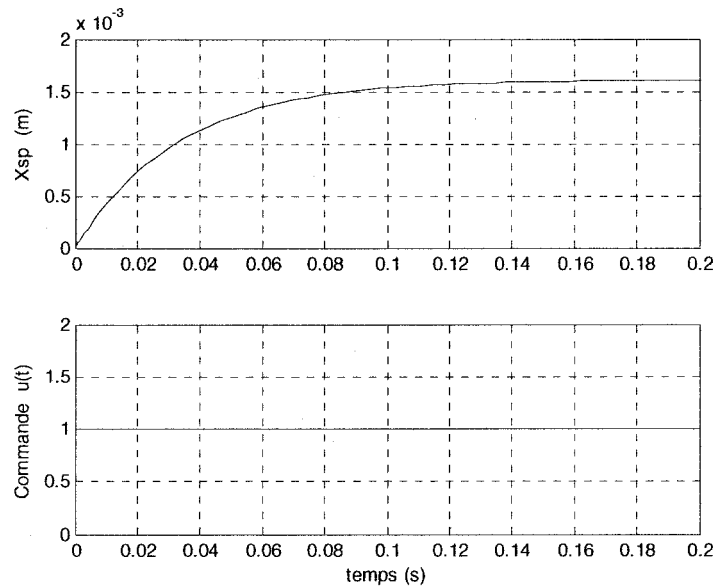


Figure 6 Allures de la commande u et du déplacement x_{sp}

1.4 Conclusion

Pour une entrée de type échelon unitaire comme indiqué à la figure 6, les résultats de la simulation indiquent un comportement logique sans surprise (basé sur les principes de la mécanique et de la physique). D'ailleurs, la figure 4 présente l'allure de la vitesse du vérin hydraulique et du déplacement de la servovalve qui se stabilisent en régime permanent après un temps de réponse de 0,15 secondes.

CHAPITRE 2

OBSERVATEURS D'ÉTATS

Une bonne maîtrise d'un procédé passe en général par une bonne information sur ce dernier. Les variables directement mesurées ne couvrant pas souvent la totalité des grandeurs mesurables susceptibles de décrire le comportement du procédé (les états), on peut se poser le problème de reconstruction de l'information non mesurée au moyen de celle qui est disponible : c'est le rôle de l'observateur d'états, ou estimateur d'états.

Dans le cas du système hydraulique que nous étudions, les états considérés lors de la modélisation sont accessibles et mesurables. Il nous restera alors à synthétiser un observateur robuste et sensible aux défauts capable de suivre la dynamique du système.

D'ailleurs, cet observateur sera le moyen sur lequel nous allons nous appuyer pour construire des redondances à partir desquelles nous allons générer des signaux capables de détecter des défauts dans le système.

2.1 Principe

Le procédé étant modélisé comme un système dynamique soumis à l'action de grandeurs externes (entrées) faisant varier un ensemble de grandeurs mesurées (sorties), l'observateur se caractérise alors par un système dynamique auxiliaire dont les entrées sont les entrées/sorties du système original tandis que les sorties mesurées donneront une estimation de l'état interne du modèle de base (états du système), selon le schéma décrit dans la figure ci-dessous.

En remplacement des capteurs physiques, très coûteux la plupart du temps et encombrant même, on peut ainsi exploiter l'observateur qui peut se substituer à un certain nombre de capteurs, il devient alors ce qu'on appelle un capteur logiciel.

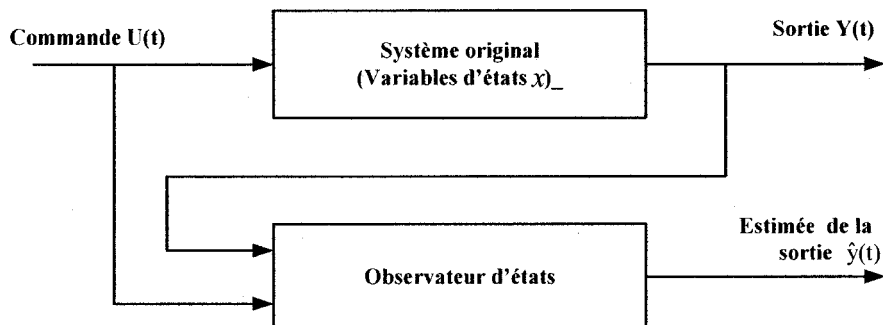


Figure 7 Observateur d'états

Afin de reconstituer l'état interne du système, un observateur s'appuie souvent sur un modèle déjà existant et qui rend compte de cet état, à savoir une représentation du système sous forme d'équations différentielles décrivant le comportement de ce dernier.

C'est une représentation d'états qui a été introduite par Kalman [20] ; en s'inspirant des résultats de ce dernier, la théorie des observateurs d'états a été initiée en 1964 par Luenberger [21] pour les systèmes linéaires continus une entrée et une sortie (SISO). L'idée comme on l'a dit plus haut est de reconstruire l'état du système lorsque celui-ci n'est pas complètement mesuré et de là, on peut utiliser cette estimation pour mesurer la sortie du système.

L'observateur est alors lui-même synthétisé sous la forme d'un système dynamique, avec son propre état interne, et une sortie devant idéalement reproduire (asymptotiquement) l'état du système observé.

À partir d'une valeur de l'état supposée à un instant donné, l'estimation asymptotique est alors assurée par une correction en ligne de cette valeur. En pratique, ce calcul s'appuie sur l'évolution de l'état prévu par le modèle du système, corrigée en fonction de l'écart entre la sortie obtenue à partir de l'état estimé et la sortie mesurée sur le système. La correction est donc avant tout choisie de façon à réduire cet écart, mais peut aussi être réglée selon les performances souhaitées telles que : rapidité d'estimation, précision, etc.

On perçoit alors l'intérêt de la méthode pour la détection de défauts qui est souvent basée sur une technique de générations d'informations redondantes par rapport à la sortie du système et d'analyse de ces redondances.

2.2 Applications

La possibilité de reconstruire une information interne sur le système au moyen des grandeurs externes disponibles peut être utile à plusieurs niveaux, citons par exemple :

- L'identification du procédé, au moyen de l'estimation des grandeurs constantes qui paramétrisent le modèle,
- La commande du procédé, qui nécessite souvent la connaissance de son état interne,
- La surveillance du procédé, à travers les écarts entre le comportement de l'observateur et celui du procédé.

2.3 Observabilité des systèmes linéaires

2.3.1 Notion d'observabilité

Un système est observable si n'importe quel état $x(t_0)$ à t_0 peut être déterminé par l'observation (la mesure) de la sortie $y(t)$ sur un intervalle de temps $t_0 \leq t \leq t_1$. L'observabilité réfère à la capacité d'estimer les états d'un système à travers ses sorties.

Soit un système linéaire invariant dans le temps décrit par le modèle linéaire idéal :

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t), \text{ avec } x(t_0) = x_0 \\ y(t) &= Cx(t)\end{aligned}\tag{2.1}$$

où $x(t)$ représente l'état du système,

$u(t)$ la commande,

$y(t)$ la sortie,

x_0 l'état initial du système,

A ($n \times n$) étant la matrice de transition ou d'évolution de l'état,

B ($n \times m$) la matrice d'entrée ou de l'application de la commande $u(t)$,

C ($p \times n$) la matrice d'observation.

Mathématiquement, une condition suffisante d'observabilité locale et globale est vérifiée à travers la matrice d'observabilité Q qui doit être de rang n (égal à l'ordre du système).

$$Q = \begin{bmatrix} C \\ CA \\ CA^2 \\ \dots \\ CA^{n-1} \end{bmatrix} \quad \text{avec} \quad \text{rang}(Q) = n \quad (2.2)$$

À noter que dans le cas d'un système non linéaire, il n'existe pas de condition géométrique globale garantissant l'observabilité. Cependant, il est possible de caractériser une observabilité faible, selon laquelle tout point est instantanément discernable de son voisin par la même condition citée plus haut selon Hermann [22].

Lorsqu'un système est observable, il existe des méthodes qui permettent de reconstruire ou estimer son état. Dans le cas de système stochastique, on utilise, par exemple, le filtre de Kalman, et lorsque le système est déterministe, on peut utiliser un observateur d'états de type Luenberger.

D'après Luenberger [23] un système dynamique libre noté S2 dont l'entrée est contrôlée par la sortie d'un système dynamique libre S1 verra sa sortie tendre vers l'état du système noté S1. C'est sur ce principe qu'est basée la théorie des observateurs.

La formulation de l'observateur peut s'écrire comme suit [23] :

$$\begin{aligned} \hat{\dot{x}}(t) &= A\hat{x}(t) + Bu(t) + K_e \left(y(t) - \hat{y}(t) \right) \\ \hat{y}(t) &= C\hat{x}(t) \end{aligned} \quad (2.3)$$

où K_e désigne la matrice de gain de l'observateur.

$\hat{x}(t)$ représente l'estimée de l'état $x(t)$.

$\hat{y}(t)$ l'estimée de la sortie $y(t)$.

L'étude de la dynamique de l'erreur de reconstruction de l'état $e(t) = x(t) - \hat{x}(t)$ permet de faire un choix de la matrice K_e . En effet en remplaçant les expressions $x(t)$ et $\hat{x}(t)$ d'après les équations (2.1) et (2.3) dans l'expression $e(t)$, on arrive à l'expression ci-dessous :

$$\dot{e}(t) = (A - K_e C)e(t) \quad (2.4)$$

Il suffit que les valeurs propres de la matrice $A - K_e C$ soient à partie réelle négative pour que l'erreur $e(t)$ converge asymptotiquement vers zéro.

2.3.2 Détermination de la matrice de gain

Il existe plusieurs méthodes permettant de fixer l'évolution dynamique de l'erreur d'estimation de l'état $x(t)$ par le choix des valeurs propres de la matrice $(A - K_e C)$.

Une méthode couramment utilisée est celle des placements de pôles [23]. Une deuxième méthode est celle de Bass et Gura selon Borne [24] ou encore celle basée sur la formule d'Ackermann à travers une transformation du système sous forme canonique observable [25]. Une méthode développée par Kautsky [26], basée sur la technique d'optimisation quadratique peut être utilisée.

2.4 Observateurs d'états des systèmes non linéaires

Les processus dynamiques souvent rencontrés dans la pratique présentent dans la plupart des cas des non linéarités qui sont parfois incontournables. Sur de tels processus, les méthodes de détection de défauts ou diagnostic basées sur des systèmes linéaires,

comme c'est le cas pour notre système, peuvent s'avérer inadaptées. Il convient alors de trouver et de traiter le système par des méthodes appropriées.

Vu que nous portons une grande attention à la génération de résidus pour la détection de défauts par la génération de redondance à travers des observateurs ou estimateurs d'états sur les systèmes non linéaires, on estime que ces derniers seront différents les uns des autres en aspect évidemment (forme) suivant la non linéarité du procédé. La seule chose essentielle qu'on doit garder en vue réside en la méthode adoptée pour la génération de résidus qui doivent être robustes vis-à-vis des non linéarités du système et n'être sensibles qu'aux éventuels défauts de procédé ou d'instrumentation.

Lorsqu'il s'agit de systèmes "fortement" non linéaires, on peut distinguer plusieurs formes dont on citera que celui qui concerne notre modèle et qu'on peut représenter sous la forme suivante :

$$\begin{aligned}\dot{x} &= f(x, u), x(0) = x_0 \\ y &= Cx\end{aligned}\tag{2.5}$$

Ces systèmes peuvent être représentés par le schéma de la figure suivante :

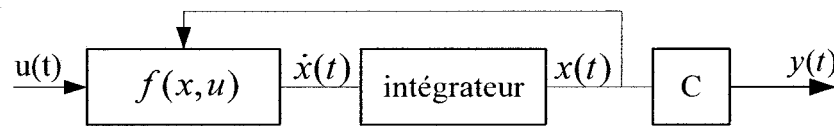


Figure 8 Représentation du système non linéaire

On pourra retrouver plusieurs méthodes de construction d'observateurs non linéaires dans la littérature [22, 27] et qui peuvent être regroupées en plusieurs grandes catégories :

- Transformation sous forme canonique pseudo linéaire,
- Observateurs adaptatifs,
- Observateurs en mode glissant,
- Observateurs à grand gain.

Une des originalités dans le domaine de l'utilisation des observateurs non linéaires pour la détection est, par exemple, celle de l'observateur de Walcott et Zak [27] qui ont utilisé la fonction de lyapunov pour l'étude de la stabilité de l'erreur d'estimation d'état de leur observateur.

Dans cette méthode, les systèmes étudiés doivent particulièrement comporter une partie linéaire et une partie non linéaire bornée avec en plus une sortie qui est fonction linéaire de l'état. La construction de l'observateur est divisée en deux étapes dont la première traite uniquement la partie linéaire en supposant l'autre partie non linéaire nulle et donc les techniques de construction d'observateurs linéaires seront appliquées en vue d'assurer la stabilité de la partie linéaire. La deuxième étape est de choisir une fonction γ telle que l'erreur d'estimation converge vers zéro lorsque t augmente toujours selon la théorie de lyapunov.

Mais les auteurs reviennent et expliquent qu'il est souvent possible d'écrire les systèmes non linéaires sous la forme de l'équation (2.6) mais la matrice de transition A qui en résulte ne permet pas toujours de stabiliser la partie linéaire du système par un choix adéquat d'une matrice de gain K_e . Ce que nous avons d'ailleurs vérifié pour notre système pour lequel la condition d'observabilité n'a pu être vérifiée et la matrice de gain K_e résultante montre clairement l'instabilité et surtout l'irréalisme des valeurs de la matrice de gain de l'observateur.

Nous pouvons expliquer tout cela par le fait que la partie non linéaire notée $g(x, u)$ est prépondérante dans la dynamique du système. Dès lors l'équation (2.5) devient :

$$\begin{aligned}\dot{x} &= Ax + g(x, u) \\ y &= Cx\end{aligned}\tag{2.6}$$

Notons que la matrice d'état A caractérise seulement la partie linéaire du système. Tandis que la fonction $g(x,u)$ est désignée par :

$$g(x,u) = \left[0, \frac{\beta_M}{V_i} x_4 (C_d w \sqrt{P_s - x_2}), \frac{-\beta_M}{V_o} x_4 (C_d w \sqrt{x_3 - P_r}), \frac{K_{sp}}{\tau} u \right]^T \quad (2.7)$$

2.5 Conception de l'observateur non-linéaire

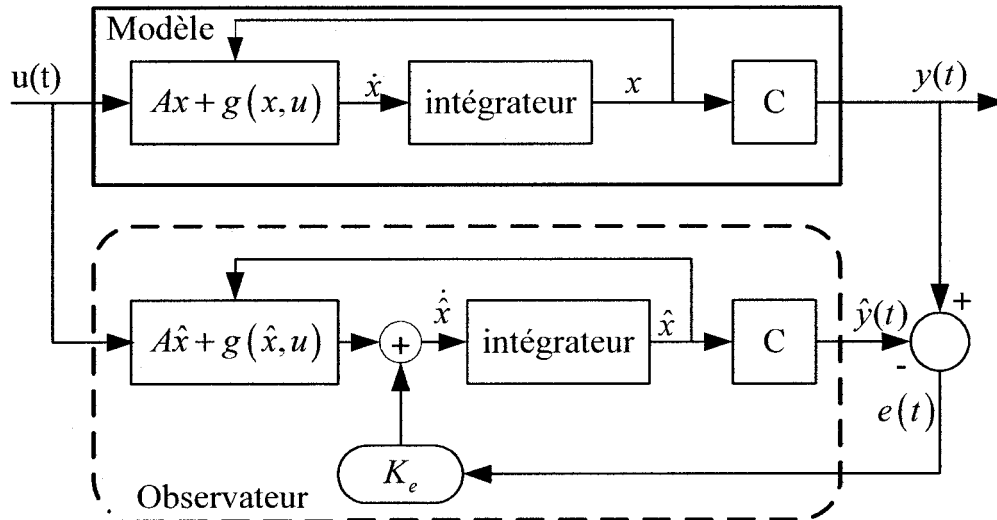


Figure 9 Schéma complet modèle-observateur

Il est évident de penser à exploiter les techniques de construction d'observateurs assez bien maîtrisées dans le cas des systèmes linéaires. Cependant, la linéarisation d'un système non-linéaire autour d'un point d'équilibre dans le but d'utiliser les techniques énumérées plus haut, n'étant pas toujours suffisantes pour satisfaire les objectifs de contrôle. Une solution serait de linéariser le système non-linéaire en plusieurs points d'équilibre ; ce qui n'est pas évident dans le cas de commutation entre deux modèles linéarisés.

La stabilité de notre observateur passera par le choix d'une matrice de gain K_e qui assurera la convergence asymptotique de l'erreur d'estimation d'état de l'observateur en deux étapes.

La première étape consiste à assurer la stabilité de la partie linéaire en supposant $g(x, u)$ dans l'équation (2.6) nulle tout en vérifiant l'équation de Lyapunov :

$$P(A - K_e C)^T + (A - K_e C)P = -Q \quad (2.8)$$

Dans le but d'étudier la convergence de l'erreur e vers zéro, on considère la fonction quadratique de Lyapunov $V(e) = \frac{1}{2} e^T P e$, où $P \in R^{n \times n}$ dont l'existence garantit la stabilité asymptotique entre autre la convergence de l'erreur vers zéro pour t suffisamment grand ($t \rightarrow \infty$).

Par un choix arbitraire d'une matrice définie positive Q et d'une matrice de gain K_e , cette dernière serait une solution possible si et seulement si il existe une matrice P symétrique définie positive qui satisfait l'expression (2.8).

La deuxième étape portera sur la partie non-linéaire $g(x, u)$ qui doit satisfaire à la condition de Lipschitz suivante :

$$\|g(x, u) - g(\hat{x}, u)\| \leq \gamma \|x - \hat{x}\| \quad (2.9)$$

Autrement dit, pour la même matrice de gain K_e , la constante de Lipschitz γ , la plus petite possible doit satisfaire la condition de l'inégalité suivante :

$$\gamma < \frac{\lambda_{\min}(Q)}{2\lambda_{\max}(P)} \quad (2.10)$$

Où $\lambda(.)$ représente les valeurs propres de la matrice $(.)$.

À partir de là, et par analogie avec l'approche classique de design d'observateurs linéaires selon l'équation (2.3), on peut établir l'équation de notre observateur comme suit :

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + g(\hat{x}, u) + K_e(y - \hat{y}) \quad (2.11)$$

où $\hat{x} = [\hat{x}_1, \hat{x}_2, \hat{x}_3, \hat{x}_4]^T$

avec

$$A = \begin{pmatrix} \frac{-f_d}{m} & \frac{A_l}{m} & \frac{-A_o}{m} & 0 \\ \frac{-\beta_M A_l}{V_i} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\beta_M A_o}{V_o} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{-1}{\tau} \end{pmatrix}, \quad g(\hat{x}, u) = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{\beta_M}{V_i} x_4 (C_d w \sqrt{P_s - x_2}) \\ \frac{-\beta_M}{V_o} x_4 (C_d w \sqrt{x_3 - P_r}) \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{K_{sp}}{\tau} \end{bmatrix} u$$

$$\hat{y} = C\hat{x} \text{ avec } C = [1, 0, 0, 0] \text{ et } K_e = [K_1, K_2, K_3, K_4]^T.$$

Ou encore sous la forme suivante :

$$\dot{\hat{x}} = \begin{pmatrix} \frac{-f_d}{m} & \frac{A_i}{m} & \frac{-A_o}{m} & 0 \\ \frac{-\beta_M A_i}{V_i} & 0 & 0 & \frac{\beta_M}{V_i} [C_d w \sqrt{P_s - \hat{x}_2}] \\ \frac{\beta_M A_o}{V_o} & 0 & 0 & \frac{-\beta_M}{V_o} [C_d w \sqrt{\hat{x}_3 - P_r}] \\ 0 & 0 & 0 & \frac{-1}{\tau} \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} \hat{x}_1 \\ \hat{x}_2 \\ \hat{x}_3 \\ \hat{x}_4 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{K_{sp}}{\tau} \end{pmatrix} * u + \begin{pmatrix} K_1 \\ K_2 \\ K_3 \\ K_4 \end{pmatrix} e_1$$

où $e_1 = x_1 - \hat{x}_1$

$$\hat{y} = (1 \ 0 \ 0 \ 0) * \begin{pmatrix} \hat{x}_1 \\ \hat{x}_2 \\ \hat{x}_3 \\ \hat{x}_4 \end{pmatrix}$$
(2.12)

En utilisant les équations (2.6) et (2.11), la dynamique de l'erreur d'estimation devient :

$$\dot{e} = (A - K_e C)e + g(x, u) - g(\hat{x}, u) \quad (2.13)$$

En conclusion, les approches théoriques ne sont pas toujours simples à mettre en œuvre et surtout difficilement envisageable pour des applications industrielles pour lesquelles les ressources humaines pour la conception de commande sont limitées.

Néanmoins, pour le but recherché, la garantie pour une bonne détection résiderait dans le fait que l'erreur de reconstruction d'état de notre observateur soit stable et nul en l'absence de défauts. Les bons résultats auxquels on est arrivés et dont la simulation confirmera dans ce qui suit donnent un bon indice pour la suite de notre travail.

2.5.1 Résultats compilés pour le design de l'observateur non-linéaire

Basés sur des simulations répétées pour le choix de la matrice de gain K_e à travers des tests "essai erreur", les résultats obtenus en référence aux relations (2.8) et (2.10) sont entre autres :

Pour une matrice de gain K_e exemplaire qui maintient la stabilité du système et qui est :

$$K_e = \begin{pmatrix} 90 \\ 70 \\ 80 \\ 0,125 \end{pmatrix}$$

et une matrice symétrique Q

$$Q = \begin{pmatrix} 0,5 & & & \\ & 0,5 & & \\ & & 0,5 & \\ & & & 0,5 \end{pmatrix}$$

Ces matrices nous permettent de déterminer la matrice P et la constante de Lipschitz γ .

$$P = \begin{pmatrix} 398 & 9 \times 10^8 & -5 \times 10^8 & 0,34 \\ 9 \times 10^8 & 1,16 \times 10^{20} & 2,1 \times 10^{20} & 1,6 \times 10^6 \\ -5 \times 10^8 & 2,1 \times 10^{20} & 3,7 \times 10^{20} & -8,8 \times 10^5 \\ 0,34 & 1,6 \times 10^6 & -8,8 \times 10^5 & 0,007 \end{pmatrix}$$

$$\gamma = \frac{0,5}{2 * 4,88 \times 10^{20}} \approx 5,19 \times 10^{-22}$$

Un autre exemple du gain d'une valeur plus grande que le précédent

$$Ke = [450 \ 400 \ 100 \ 0.52]^T \text{ et une matrice symétrique } Q = \begin{pmatrix} 2 & & 0 \\ & 1 & \\ 0 & & 0,2 \\ & & & 0,5 \end{pmatrix} \text{ nous}$$

donnent une valeur de la constante de Lipschitz $\gamma = 9,346 \times 10^{-25}$.

Nous remarquons qu'avec une constante de Lipschitz plus petite et un gain plus grand que les précédents gains testés, la réalisation pratique du système serait moins intéressante que dans le premier cas. Pour des raisons pratiques de réalisation, nous allons utiliser le gain $Ke = [90 \ 70 \ 80 \ 0,125]^T$ pour la simulation.

2.5.2 Analyse de la stabilité et de la sensibilité de l'observateur

Dans cette partie, nous allons analyser le comportement de notre observateur à travers sa stabilité et sa sensibilité. Etant donnée, que la génération de résidus est la clé de la méthode envisagée pour la détection de défauts dans le système, il est impératif que l'observateur puisse être stable et sensible aux défauts pouvant affecter le système en mode de fonctionnement à tout instant. C'est pour cela que nous allons simuler notre système modèle-observateur afin de nous assurer de son efficacité. On entend par sensibilité de l'observateur, sa capacité à déceler les moindres petits écarts entre les paramètres réels du système et ceux estimés. Pour ce qui est de sa robustesse on la voit dans sa capacité de converger asymptotiquement vers une valeur qui permettra d'évaluer le résidu généré.

Il est à noter que si l'on veut répertorier tous les défauts possibles d'un système dynamique ou d'une installation industrielle quelconque, la tâche risque d'être difficile et longue, voir interminable; c'est pour cela que nous allons nous limiter à quelques paramètres qu'on juge pertinents dans le fonctionnement de notre système hydraulique.

Il peut s'agir essentiellement d'un bruit additif sur un capteur ou un actionneur ou tout simplement par une variation des paramètres du modèle du procédé.

Dans les systèmes hydrauliques les principales fluctuations qui modifient les paramètres du modèle sont dues essentiellement à l'environnement qui l'entoure; On veut dire par là les effets de la température sur le fluide en question qui affecte directement plusieurs facteurs tels que la densité, le facteur de compressibilité, le coefficient de décharge et même la viscosité du fluide (coefficient de frottement). Par ailleurs la pression d'alimentation issue de la pompe peut être la source de défaillance du système.

Dans ce qui suit, nous allons évaluer la sensibilité et la stabilité de l'observateur face à ses perturbations envisagées.

2.5.2.1 Analyse de l'observateur en mode normal (sans défaut)

Pour le système ainsi modélisé, nous estimons que les erreurs se situent entre 5% et 10%. Ce qui est tout à fait normal lors de la conception d'un modèle.

Les résultats de la simulation, pour une entrée échelon unitaire avec des conditions initiales nulles, selon l'expression (2.11) sont représentés ci-dessous :

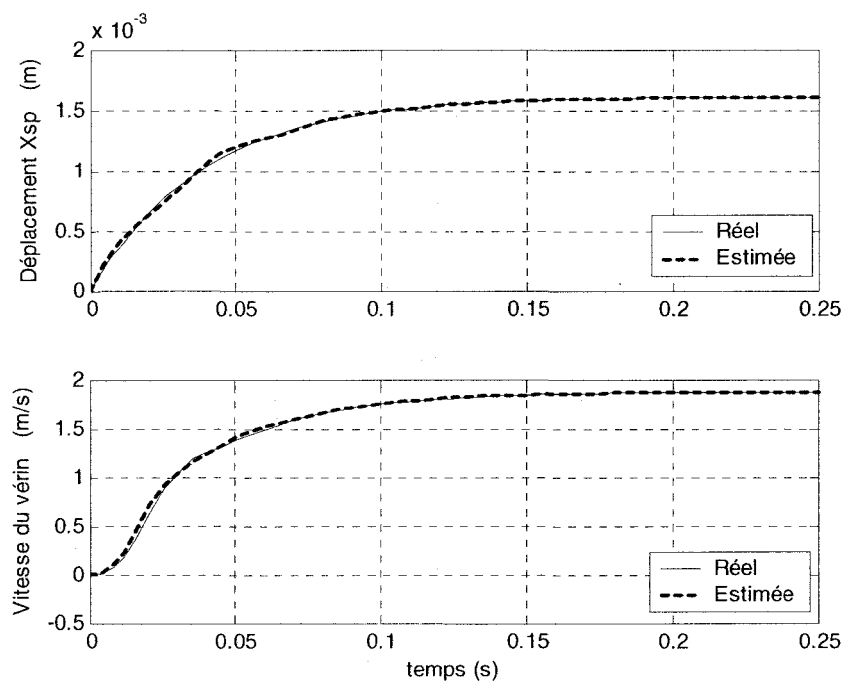


Figure 10 Évolution des états réels et estimés

Nous voyons à travers la figure 10 et 11, que l'observateur arrive à suivre le système avec une bonne précision; d'ailleurs, les erreurs de poursuite comme le montrent les figures 12 et 13 confirment la robustesse et la stabilité de notre observateur.

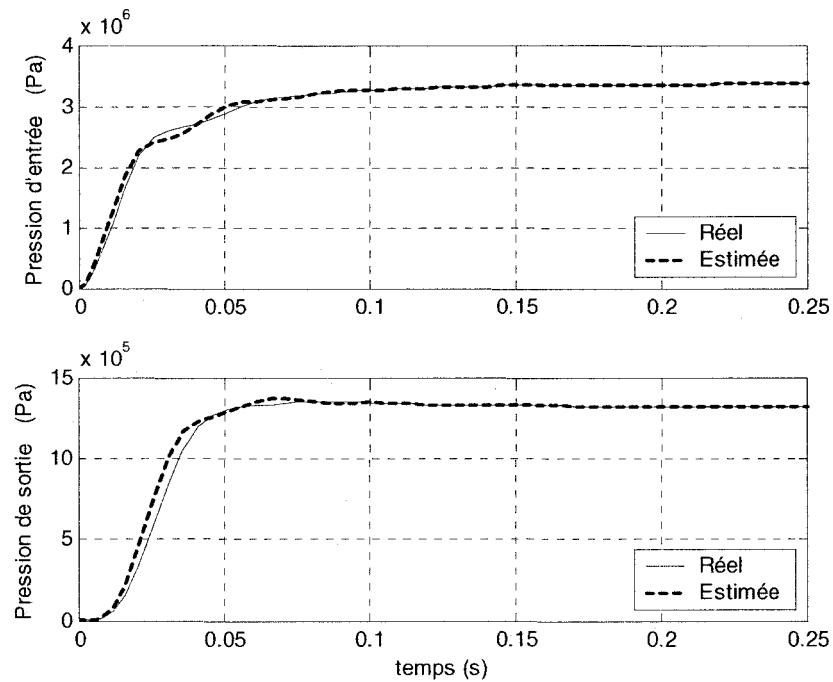


Figure 11 Évolution des pressions P_i et P_o

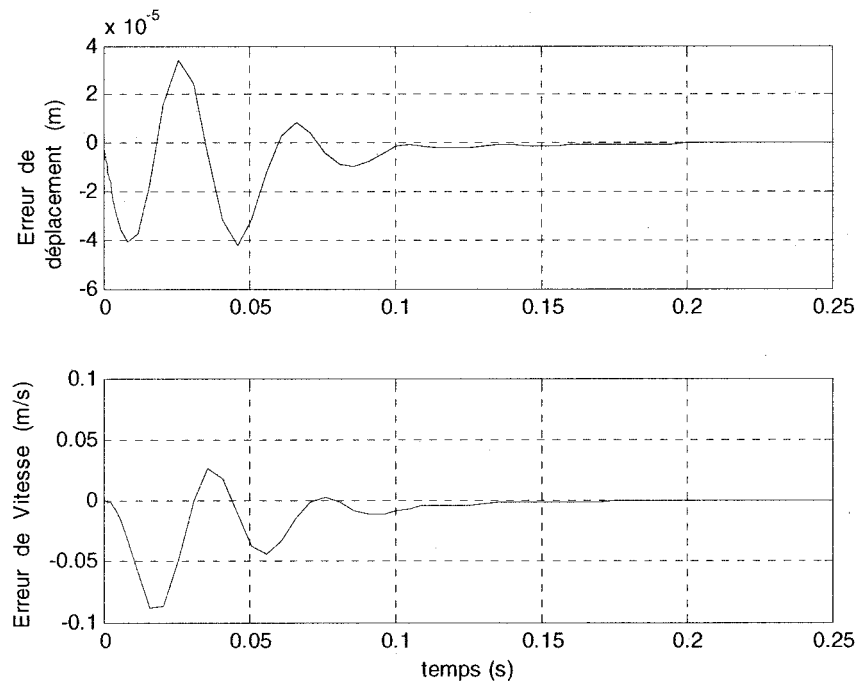


Figure 12 Erreur de poursuite (en mode normal)

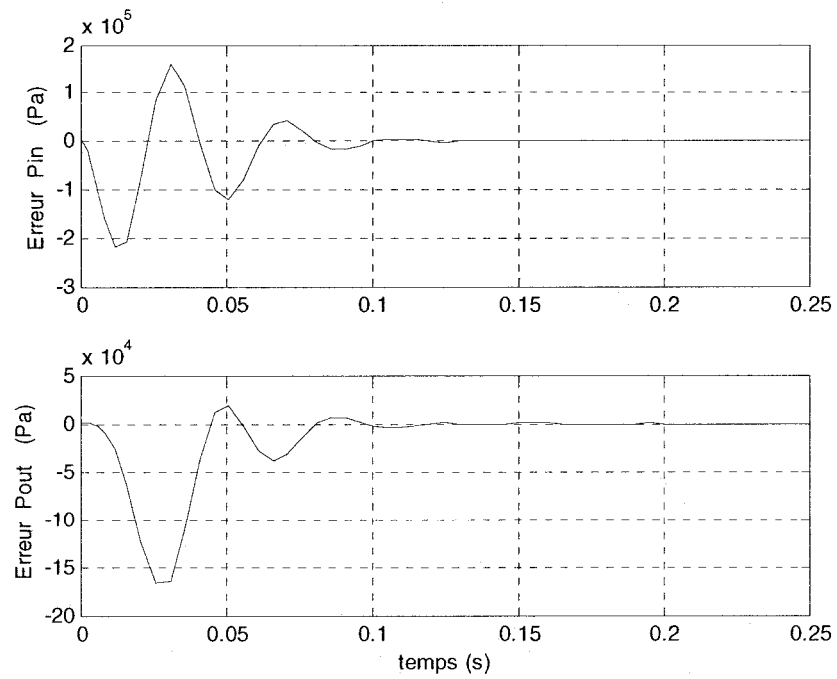


Figure 13 Erreur de poursuite P_i et P_o (en mode normal)

2.5.2.2 Défaut de la pression d'alimentation

Pour un bon fonctionnement du système hydraulique lors de l'ouverture du tiroir de la servovalve ainsi que le déplacement du vérin, il est important de maintenir une vitesse constante au niveau du récepteur (vérin) au démarrage ainsi qu'au freinage. Dans le cas contraire il y a risque de ne pas atteindre la distance d'ouverture du vérin (course de la tige).

Pour notre simulation, nous avons considéré une perturbation due essentiellement à des fuites externes (via les joints et les canalisations) et internes (fuites entre les chambres), équivalente à 30% de la pression nominale ce qui peut représenter à notre avis une fluctuation considérable. A rappeler, que les professionnels en conception de tels circuits hydrauliques sont familiers avec ce genre de problème et s'arrangent toujours à corriger cette éventuelle défaillance par un limiteur de pression (en aval de la pompe) et en amont du récepteur hydraulique.

Les résultats de la simulation, pour une entrée échelon unitaire avec des conditions initiales nulles, toujours selon l'expression (2.11) sont représentés ci-dessous :

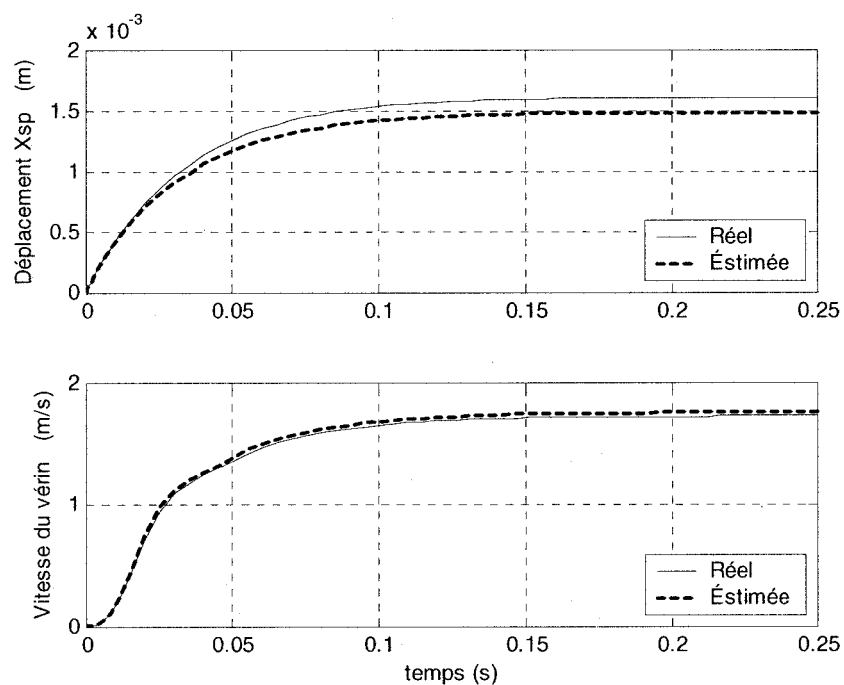


Figure 14 Effets de la variation de pression d'alimentation P_s

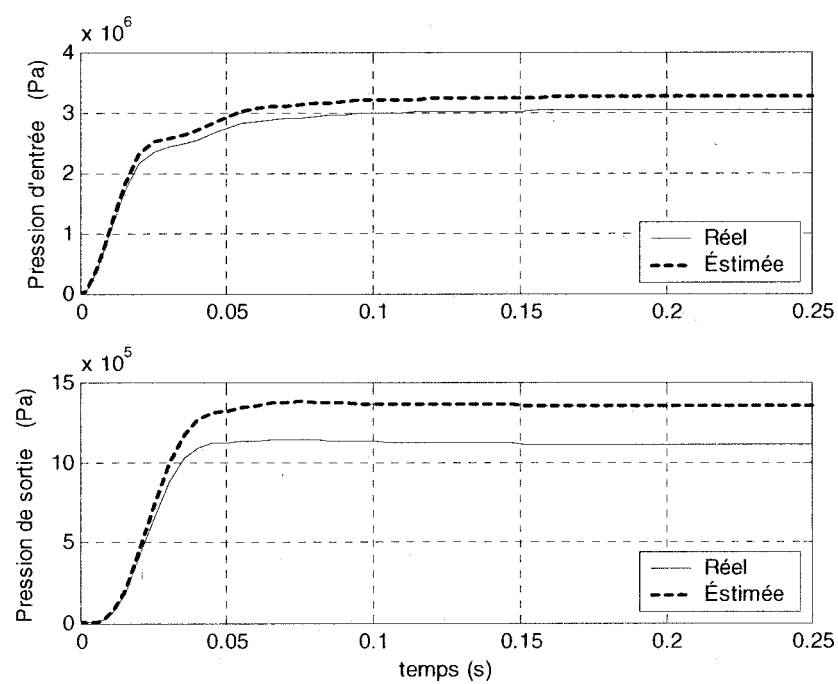


Figure 15 évolution des pressions P_i et P_o réels et estimés

Encore une fois, l'observateur confirme sa robustesse et sa stabilité illustrées sur les figures 14 et 15 qui représentent l'évolution des états y , x_{sp} , P_i et P_o de notre système, mais encore sa sensibilité face aux défauts l'affectant ; ce que nous voyons clairement sur les figures 16 et 17 où l'on observe des erreurs de poursuite significatives.

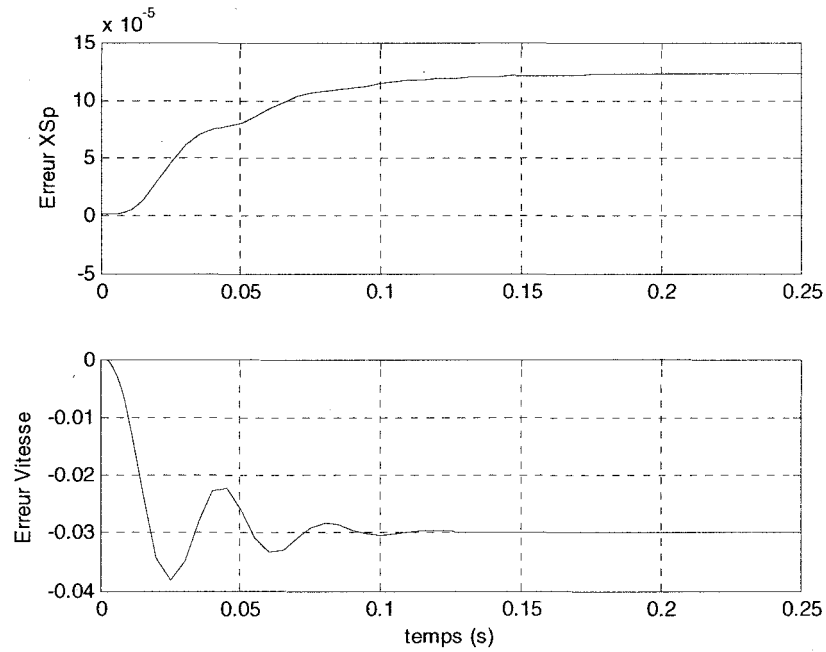


Figure 16 Erreur de poursuite (défaut de pression P_s)

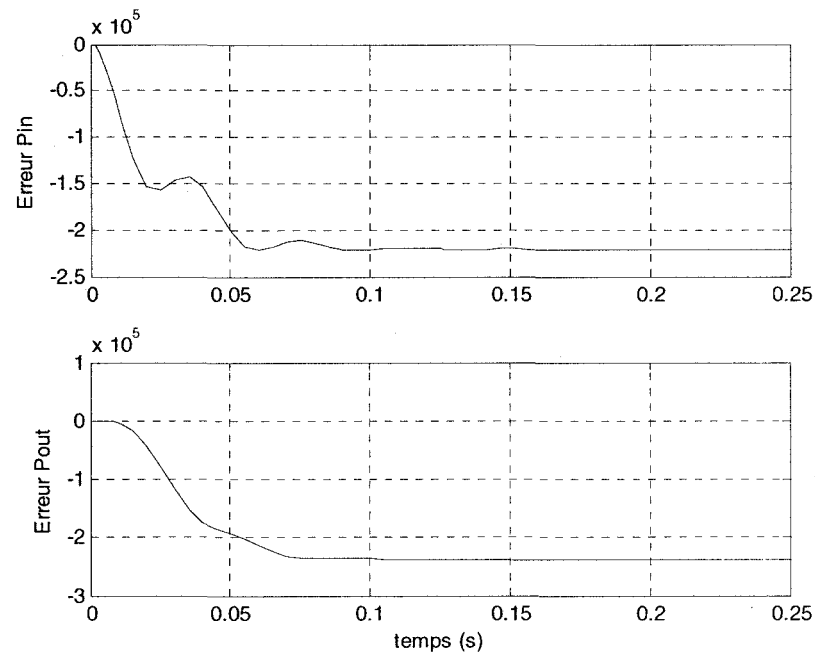


Figure 17 Erreur de poursuite P_i et P_o (défaut de pression P_s)

2.5.2.3 Défaut de frottement visqueux

De la même façon que précédemment, nous avons considéré une fluctuation de la valeur du coefficient de frottement visqueux de 15% (1360 à 1840 N.s/m²) de la valeur nominale.

Les résultats de la simulation, pour une entrée échelon unitaire avec des conditions initiales nulles, selon l'expression (2.11) sont représentés ci-dessous :

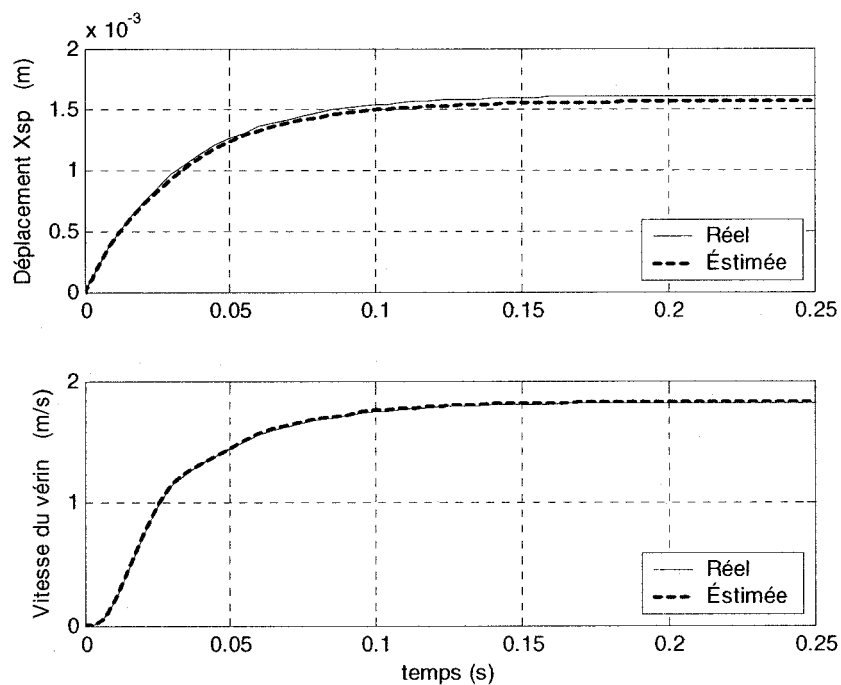
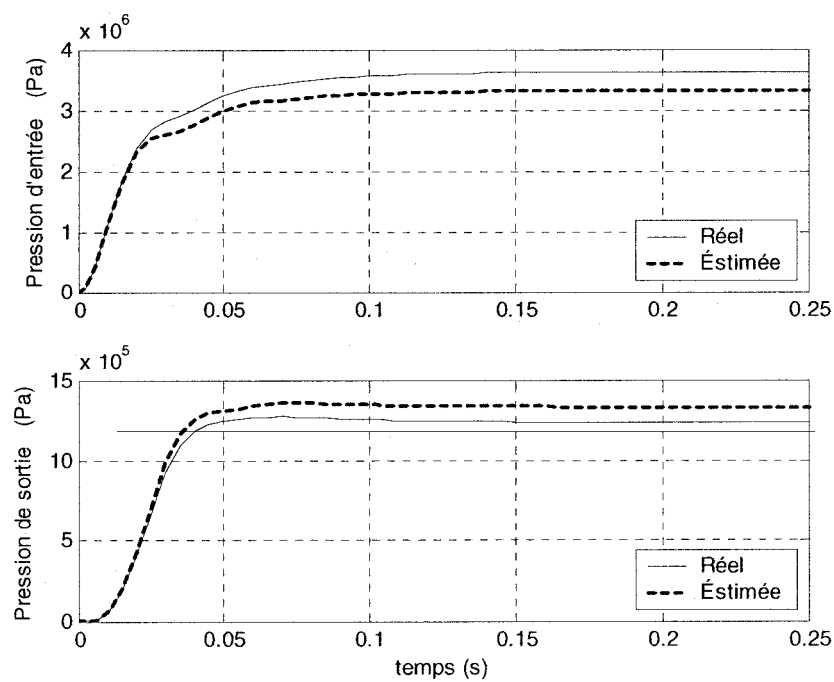


Figure 18 Effets du frottement

Figure 19 évolution des pressions P_i et P_o

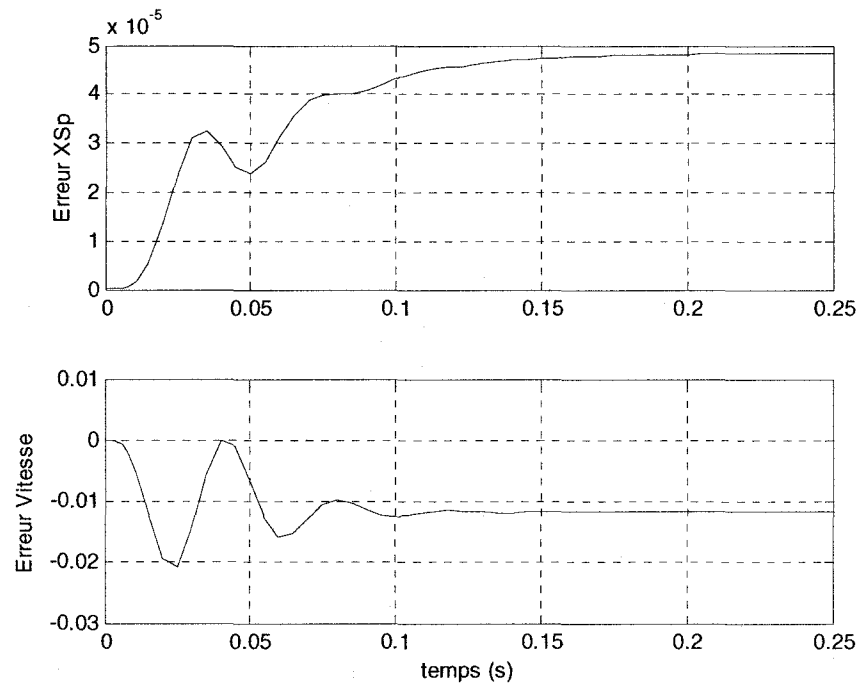


Figure 20 Erreur de poursuite (Défaut de frottement)

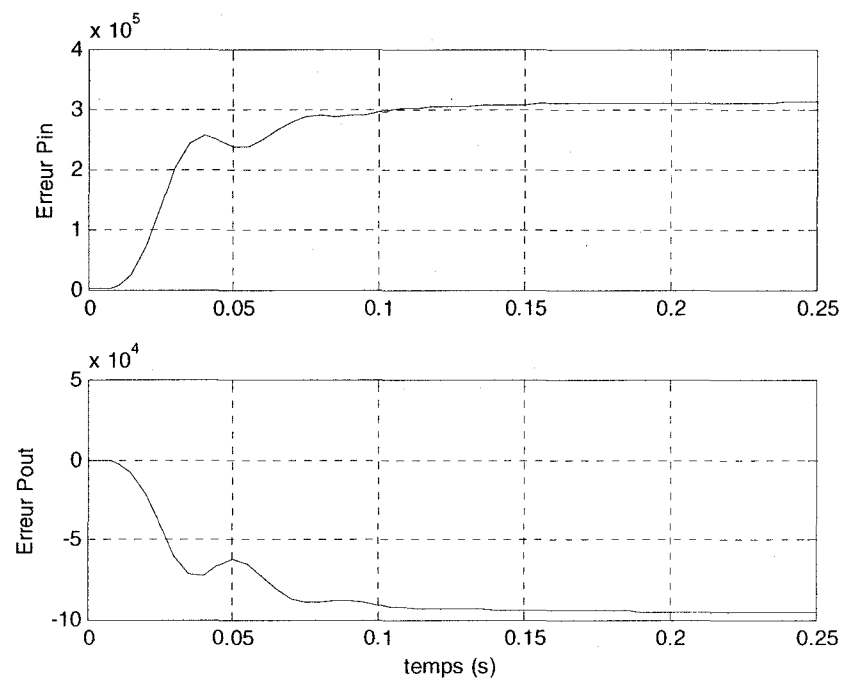


Figure 21 Erreur de poursuite P_i et P_o (Défaut de frottement)

2.5.2.4 Défaut du module de compressibilité

Les débits de fuite ne constituent qu'une partie du manque total en fluide. Une autre partie "souvent aussi importante, sinon plus, que la précédente" est imputable à la compressibilité du fluide et à la dilatation des conduites. On détermine la compressibilité d'un fluide en mesurant la variation relative de volume due à une variation de pression, soit :

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{\Delta P}{\beta_M} \quad (2.14)$$

où β_M est le module de compressibilité volumique du fluide.

La valeur de ce module est de l'ordre de 1500 MPa pour les fluides hydrauliques courants, une variation de pression de 15 MPa n'entraîne qu'une variation relative de volume de 1%. Néanmoins, la présence de petites quantités d'air avec le fluide exerce une influence considérable sur la valeur du module de compressibilité β_M .

Dans la pratique, on compense ce déficit par une pompe qu'on appelle pompe de gavage. Celle-ci assurera en tout temps une pression supérieure à la pression atmosphérique dans la branche à basse pression du circuit hydraulique, et ce même dans les conditions de fonctionnement les plus difficiles (Démarrage et freinage brusques, chocs, haute température, dépassements de vitesse, etc.); d'où l'importance du module β_M dans le fonctionnement d'un système hydraulique et même pour le dimensionnement de la pompe de gavage. Encore une fois nous avons considéré une plage de fluctuation de ce paramètre de $\pm 20\%$ de la valeur nominale.

Les résultats de la simulation, pour une entrée échelon unitaire avec des conditions initiales nulles, toujours selon l'expression (2.11) sont représentés ci-dessous :

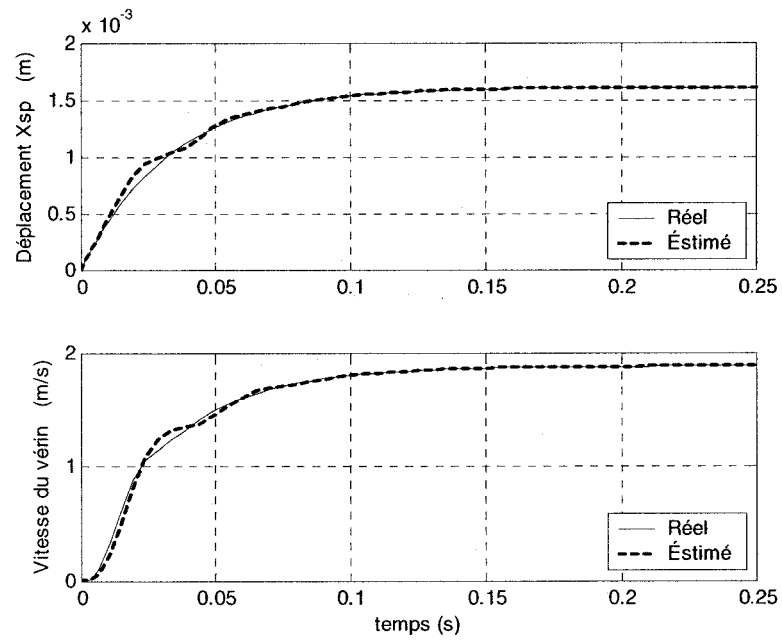


Figure 22 Effets du coefficient β_M

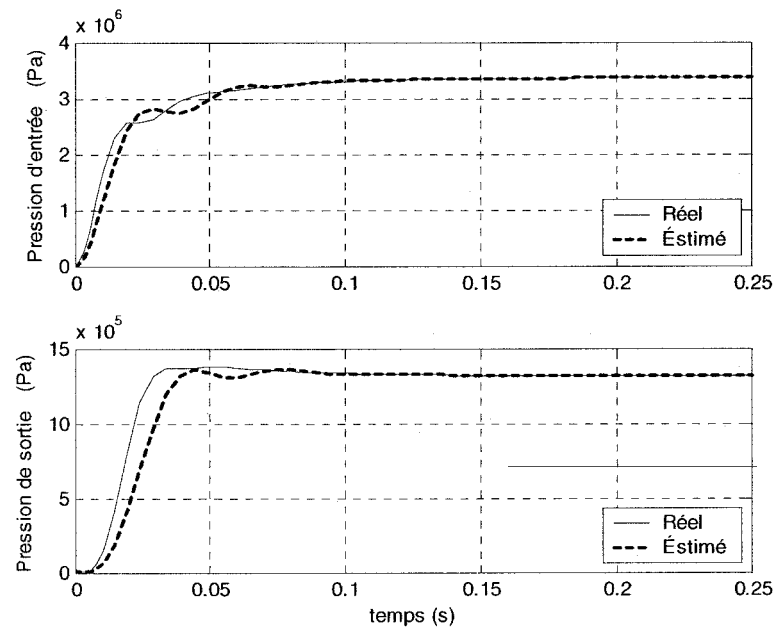


Figure 23 Évolution des pressions P_i et P_o

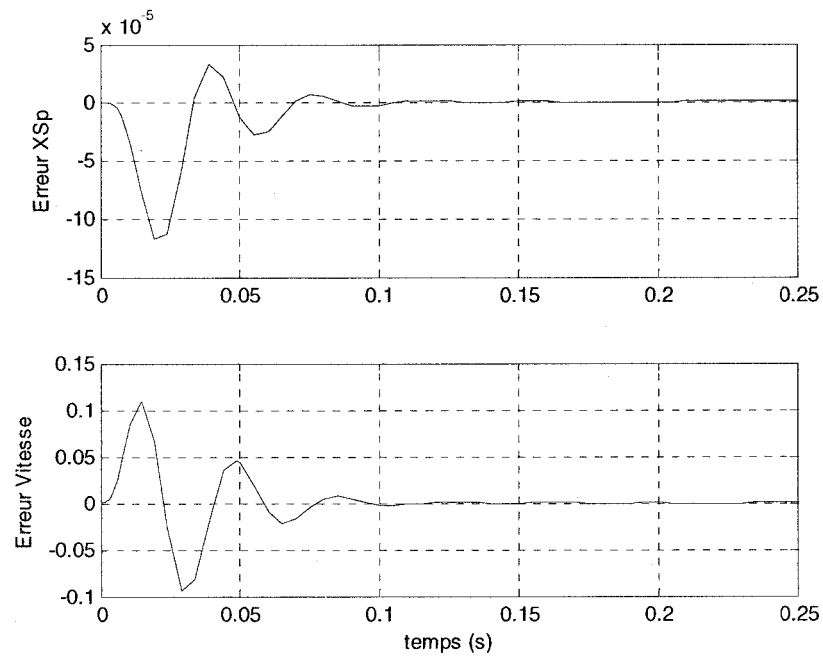


Figure 24 Erreur de poursuite (Défaut de β_M)

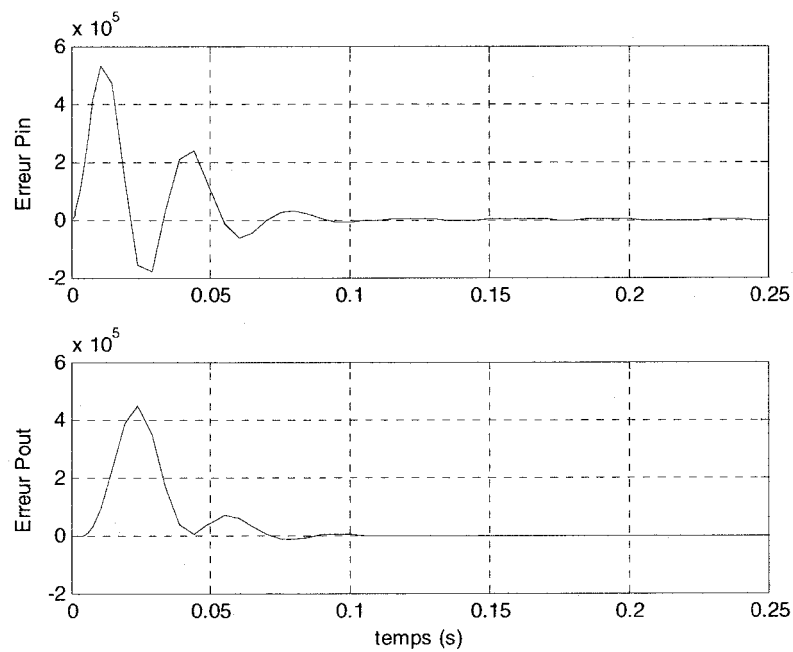


Figure 25 Erreur de poursuite (Défaut de β_M)

2.5.2.5 Défauts d'usure géométrique (au niveau des chambres) du vérin

La tige du vérin étant constamment sollicitée ce qui entraîne avec le temps une déformation géométrique des surfaces (usure) au niveau des chambres du vérin, encore une fois nous ne voulons pas écarter cette possibilité nettement observée en industrie.

Les résultats de la simulation, pour une entrée échelon unitaire avec des conditions initiales nulles, selon l'expression (2.11) sont représentés ci-dessous :

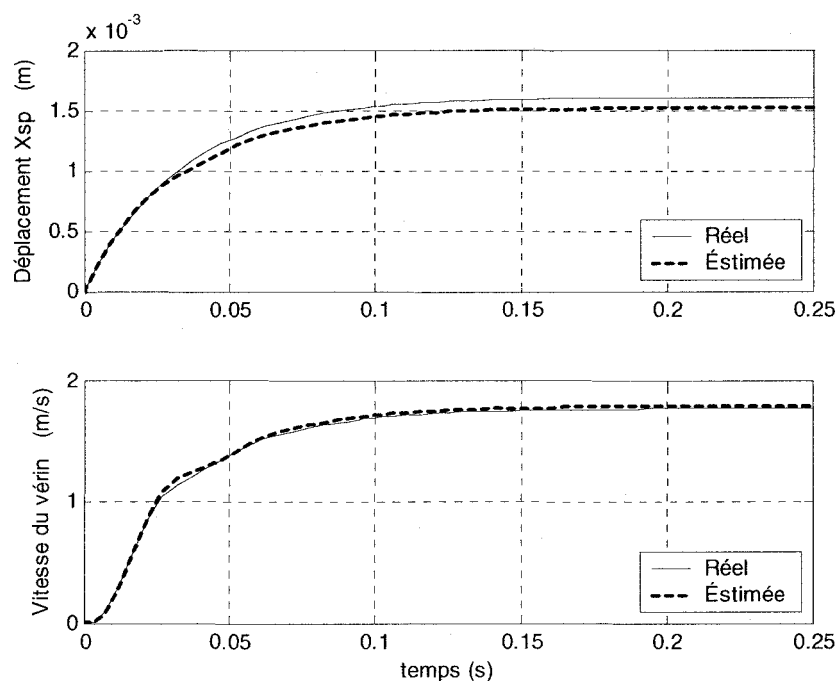


Figure 26 Effets de l'usure des chambres du vérin

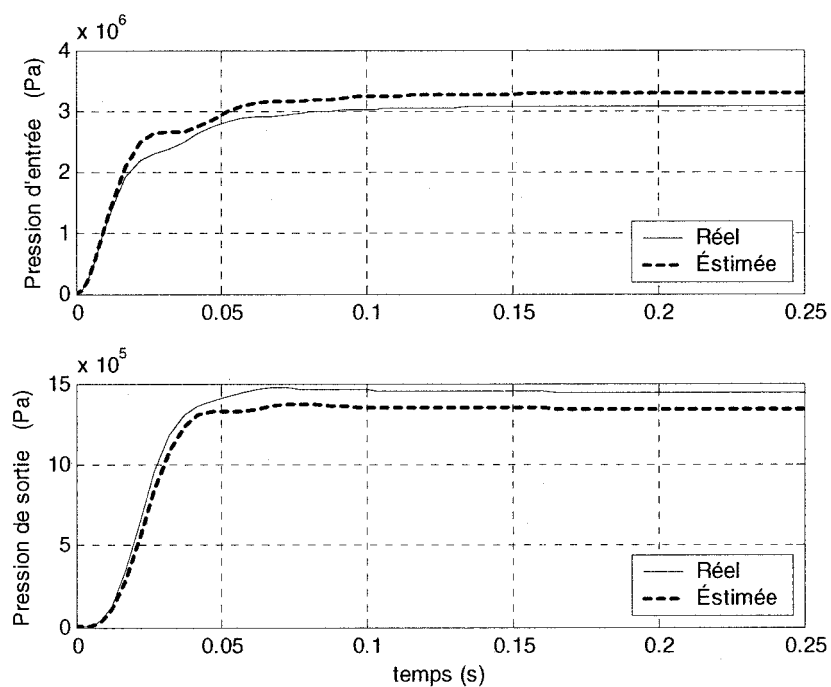


Figure 27 Évolution des pressions P_i et P_o

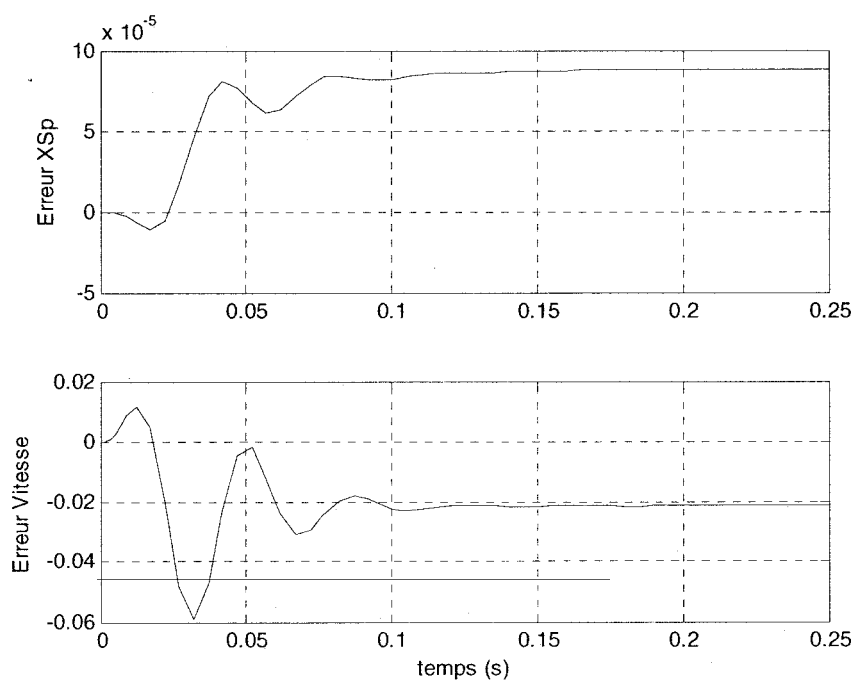


Figure 28 Erreur de poursuite

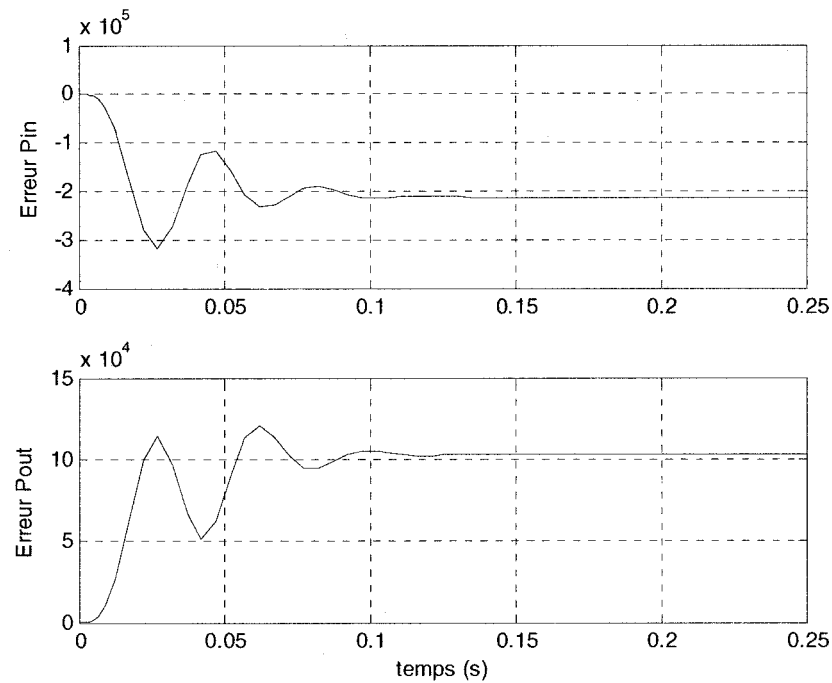


Figure 29 Erreur de poursuite P_i et P_o

2.5.3 Conclusion

Les résultats des simulations qu'on a observés, montrent clairement l'efficacité de l'observateur qui se traduit essentiellement par une stabilité, une robustesse et une sensibilité face aux perturbations (bruits et défauts) qu'on pourrait rencontrer.

La matrice de gains K_e appliquée au système modèle-observateur répond d'une façon satisfaisante et nous voyons sur les graphiques que les erreurs d'estimations (ou plus précisément d'observations) sont bien décelées.

Le but recherché dans notre cas, c'est d'arriver à détecter un ou plusieurs défauts sans se soucier de l'aspect isolation du défaut qui peut être une bonne façon de corriger le système en faute. Sauf que, cette approche nécessiterait des observateurs dédiés à

chaque état pour arriver à déterminer la partie défaillante du système. En conclusion, la qualité ainsi que la performance de la détection dépendront de la qualité du modèle et de la précision de la mesure.

CHAPITRE 3

DETECTION ET DIAGNOSTIC DE DEFAUTS

Introduction

La sûreté est définie comme un ensemble de propriétés indispensables à une installation industrielle ou un système en général. La surveillance se réfère à la capacité de reconnaître un comportement anormal et de le signaler. La supervision est fondée sur la surveillance et la capacité d'agir, pour éviter des dommages sur l'installation et pour continuer la production, si cela est possible.

Une défaillance est définie comme l'inaptitude d'un composant à remplir toute ou une partie de sa fonction. Un défaut est un écart entre un comportement attendu et un comportement observé. Constaté grâce à un indicateur de défaut, il révèle la présence d'une défaillance. L'indicateur de défaut est en pratique élaboré grâce aux variables mesurables de l'installation.

Il est clair aussi que pour s'attaquer à ce problème, il faut des connaissances approfondies sur le système entre autres : les connaissances de son comportement normal, mais aussi de son comportement anormal au voisinage d'un point de fonctionnement précis (ce qui serait l'idéal).

On peut distinguer plusieurs modes de défaillances, qui sont les différents états que peut prendre un procédé sous l'effet d'une panne ou d'un dysfonctionnement. Ces modes particuliers peuvent nécessiter soit d'arrêter immédiatement le système, soit de basculer la commande vers un mode de repli, ou encore vers un mode dégradé qui consiste à

modifier les consignes des boucles locales ou même à l'extrême l'architecture de la commande.

On voit donc l'intérêt de la détection de défauts (diagnostic) qui est de nos jours primordial pour la fiabilité, la disponibilité, la maintenabilité et l'efficacité des systèmes.

Dans ce chapitre, nous allons explorer les différentes méthodes de détection de défauts et par la suite faire le choix pour une méthode qui sera appliquée à notre système hydraulique sans oublier de faire le tour des différents travaux qu'on a retrouvés dans la littérature.

3.1 Description des différents types de défauts

Les principaux défauts qui pourront affecter notre modèle hydraulique sont essentiellement dus à la variation de la pression d'alimentation issue de la pompe, la variation de la compressibilité du fluide avec la dilatation des conduites (en raison des variations de température) et la perte de viscosité dont le degré conditionne l'écoulement du fluide le long des parois. Et pour terminer, sans avoir tout citer, on notera les défauts occasionnés par la perte ou le dysfonctionnement de capteurs ou d'actionneurs.

Il est évident que si on veut parler ou même représenter tous les défauts possibles d'une installation industrielle, la tâche risque d'être considérable. De ce fait, on ne pourra cerner tous les défauts susceptibles d'affecter notre système et par conséquent, lors du diagnostic de défauts sur un système, il est inutile de faire une distinction entre les différents défauts en vue d'une accommodation dont l'objectif premier est la compensation de leurs effets sur le système.

Souvent, un défaut est modélisé avec les mêmes outils que ceux utilisés pour représenter le procédé à l'état normal. On considère, par exemple, qu'il s'agit d'un signal parasite

qui vient s'additionner en quelque point du schéma fonctionnel. On parle alors de "défaut additif". Un signal additif sur un capteur peut modéliser son offset (signal constant), sa dérive (signal en rampe). De même, un signal additif sur un actionneur (mauvaise ouverture d'une vanne, tiroirs de servovalves ou mauvais positionnement d'un moteur). Une perturbation non mesurable peut servir à représenter un défaut tel que : un débit de fuite dans un vérin ou un réservoir.

D'autres défauts se caractérisent plus aisément par la modification (ou fluctuation) des paramètres du modèle du procédé. Ils sont connus sous le nom de "défauts multiplicatifs".

3.2 Principe de la détection

On a toujours compté sur les alarmes pour faire de la détection ou encore de la surveillance, d'ailleurs les alarmes sont traditionnellement des symptômes de comportement anormal souvent utilisées pour faciliter la supervision d'une installation. Le terme seuil d'alarme revenait souvent pour s'assurer que chaque variable du système se trouvait bel et bien à l'intérieur d'une plage définie par les seuils haut et bas.

Des problèmes liés à l'utilisation de ces alarmes traditionnelles peuvent être vus comme suit : des seuils faibles donnent des fausses alarmes fréquentes où le système fait croire à un défaut alors que la situation est normale tandis que les seuils élevés font croire à une situation contraire présentée comme un manque à la détection. Cependant ces dépassements de seuils sont toujours d'une grande utilité, c'est bien évidemment le cas des arrêts d'urgence.

Toujours par rapport au passé, l'intervention humaine était souvent essentielle pour apporter des ajustements en ligne afin d'assurer le bon fonctionnement du procédé, sauf

qu'on peut comprendre aisément qu'il est difficile pour un opérateur humain, voir impossible, de surveiller en même temps un grand nombre de variables (compromis difficile entre fausses alarmes et manque à la détection).

Une des difficultés à laquelle on fait face, est qu'il est difficile de choisir a priori les seuils haut et bas de chaque variable du fait que ces dernières n'étant pas indépendantes mais reliées entre elles, en toute logique leurs seuils aussi.

L'utilisation du modèle du procédé pour évaluer ces derniers nous permettrait d'éviter une conséquence pratique souvent rencontrée en industrie et qui se traduit, dans le cas d'un dysfonctionnement se propageant dans toute l'installation, par un dépassement des seuils dans un ordre aléatoire, d'où une interprétation difficile de la séquence temporelle d'alarmes.

On a longtemps compté sur la redondance matérielle pour garantir la sûreté et la fiabilité d'une installation (surtout sensible), mais ces solutions sont souvent très coûteuses et qui ont été vite remplacées par la redondance analytique qui repose sur les mesures disponibles sur le système.

Celle-ci repose sur l'utilisation du modèle qui permet de lever bien des problèmes mentionnés plus haut du fait que les indicateurs représentent des écarts de comportement uniquement liés aux défaillances et aux incertitudes sur le modèle et les mesures. L'avantage réside dans la possibilité de mettre des seuils beaucoup plus faibles, pour la génération de symptômes, et avoir ainsi une détection nettement plus précoce. Ce qui rend le seuil de détection fonction de la qualité du modèle et de la précision de la mesure.

Dans ce qui suit, nous allons énumérer les grandes familles de méthodes de détection existantes et par la suite sélectionner une méthode appropriée pour notre système hydraulique.

3.3 Les méthodes de détection et diagnostic

Les méthodes de diagnostic sont nombreuses et variées car elles correspondent à la diversité des problèmes rencontrés. D'ailleurs sur un problème un peu complexe, il n'est pas rare de faire appel à plusieurs méthodes. Principalement, ces méthodes sont regroupées en trois grandes catégories, dont la première repose essentiellement sur le traitement de données, la seconde fondée sur des modèles quantitatifs du procédé et enfin la dernière catégorie basée sur des modèles qualitatifs. On peut les classer d'ailleurs selon le schéma ci-dessous.

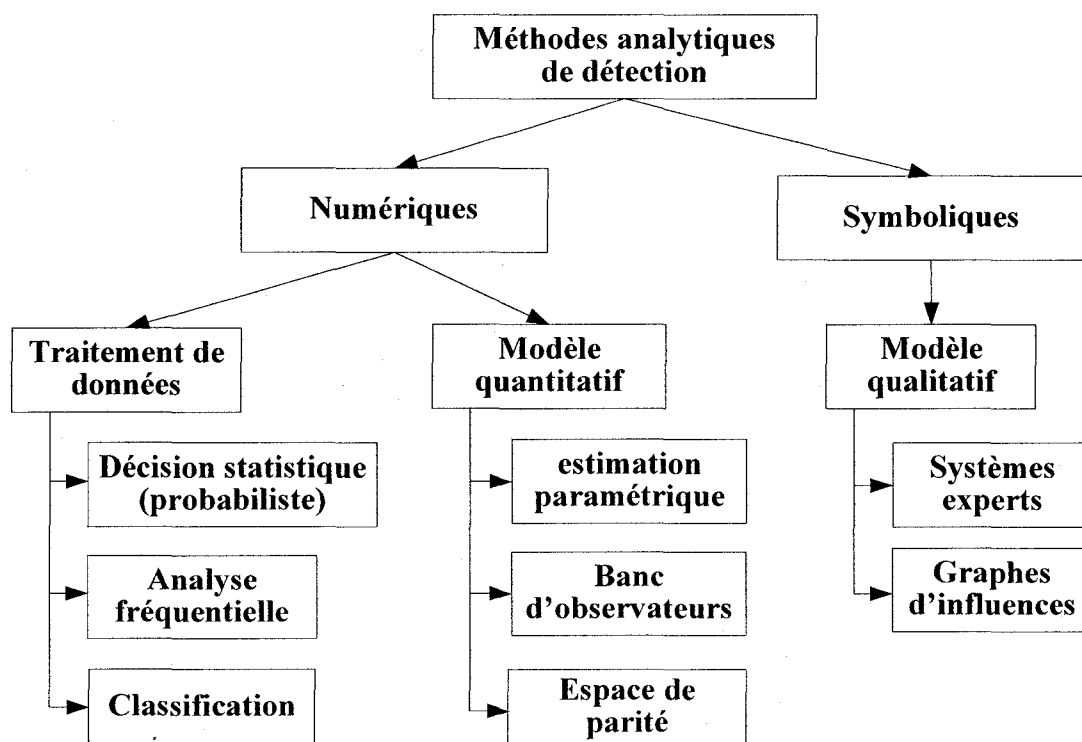


Figure 30 Les méthodes de détection

3.3.1 Modèles fondés sur le traitement de données

Dans un certain nombre de cas, il est impossible d'obtenir le modèle mathématique du procédé, ou d'une partie de celui-ci, traduisant le comportement du système. On peut toutefois analyser les signaux issus de l'instrumentation et proposer pour chacun de ces signaux un modèle, qui sera en fait une référence du comportement de ce signal, en général statistique, et qui pourrait être représentative de l'état normal du système ou d'un défaut particulier on parle dans ce cas là d'une "Décision statistique".

Dans cette approche, on analyse les signaux issus du procédé pendant son fonctionnement normal et on en déduit une loi de densité de probabilité pour chaque signal. Il restera alors à s'assurer que ce dernier obéit bien à cette loi ou s'en écarte significativement. Le seul inconvénient sera de travailler sur une fenêtre temporelle longue pour assurer un traitement en temps réel.

De nombreux tests ont été proposés, en particulier saut de moyenne et/ou saut de variance (sous l'effet d'un défaut, la moyenne du signal varie et/ou son écart type) [28],[29]. Une autre approche basée sur la représentation spectrale en fréquence via la transformée de Fourier rapide où on utilise une fenêtre temporelle glissante.

On a vu aussi l'introduction des notions de classification floue, qui par l'indice d'appartenance permet d'affirmer que les classes des données en main appartiennent à un prototype déjà connu et qui représenterait un état de fonctionnement du système [30]. Sans oublier de mentionner que l'apprentissage est primordial et doit être le plus complet possible afin que la classification permette de localiser tous les modes de défaillance, ce qui est très difficile à garantir pour un procédé d'une certaine complexité.

3.3.2 Outils fondés sur les modèles quantitatifs

Dans cette approche le modèle est utilisé pour engendrer des indicateurs de défauts; leur interprétation constitue les symptômes du mauvais comportement du système. Ces indicateurs ne sont autres que les résidus qui ont toujours été la préoccupation des automaticiens qui s'intéressent particulièrement à la sortie du procédé qui ne peut être qu'en fonction de l'entrée, des défauts mais aussi de perturbations non mesurables.

La phase d'évaluation des résidus, en d'autres termes la conversion de leur valeur numérique en symptôme, n'est pas aussi simple car en fait le modèle n'est jamais parfait et les mesures sont souvent entachées de bruit. Ce qui nous amène à considérer un autre problème qui stipule qu'un résidu n'est jamais nul. Il faut en conséquent faire la différence entre un résidu de "valeur faible" qui caractérise en général un fonctionnement normal, et un résidu de "valeur forte" qui caractérise une défaillance ; même à cela, on peut dire que cette évaluation reste compliquée du fait que les sensibilités de ces résidus aux différents défauts peuvent être très différentes. Pour engendrer les résidus, on retrouve trois grandes familles fondées sur les équations du modèle. Pour chacune d'entre elles, nous allons donner un bref aperçu.

La première méthode repose sur l'estimation des paramètres du modèle, supposé connu ou du moins une assez bonne connaissance, censés être représentatifs du fonctionnement normal. L'estimation se fera soit en temps réel, soit hors ligne mais de manière fréquente (cyclique, par exemple).

Plus intéressante sera cette méthode si on arrive à établir un lien entre les valeurs de ces paramètres et certains composants précis de notre système, on est arrivé là au stade de localisation de défauts. Cette méthode est bien adaptée aux défauts multiplicatifs. Un bon exemple d'application industrielle traité par Isermann [3].

Cette méthode reste autant intéressante que le modèle qu'on traite est continu fondé sur les connaissances premières du procédé, et bien adaptée aux défauts multiplicatifs. Et rappelons aussi que pour tout problème d'estimation de paramètres, si le procédé est mal excité, celle-ci converge mal ou pas du tout.

La deuxième approche connue sous le nom de "espace de parité", utilise le modèle complet de l'installation pour combiner de différentes façons les équations qui le composent, en générant à chaque fois un résidu fondé sur les mesures, et réalise ainsi la détection en vérifiant le dépassement d'un seuil par les résidus suivi d'une localisation à travers la reconnaissance de la signature [9].

La troisième approche repose sur les bancs d'observateurs, qui se réfèrent en général au modèle du procédé (vu au chapitre précédent), qui sont des algorithmes chargés de poursuivre l'état du système. Dans la plupart des cas, on veut isoler les défauts pour rendre ainsi l'observateur indépendant des perturbations non mesurées (ou inconnues) et dépendants essentiellement de certains défauts [1]. Dans la littérature, on propose deux méthodes : les bancs d'observateurs dédiés et les bancs d'observateurs généralisés.

3.3.3 Outils fondés sur les modèles qualitatifs

Dans certaines situations, il n'est pas possible d'obtenir un modèle mathématique précis de l'installation à diagnostiquer. Cependant, on possède des connaissances qualitatives sur son comportement (normal et anormal). Un exemple de connaissance qualitative est « quand le débit augmente, le niveau monte » ou encore « lorsque la vanne est bloquée, le niveau monte ». Cette connaissance s'exprime avec des symboles et peut être traitée, en simulant le raisonnement logique humain, par des techniques informatiques relevant de l'intelligence artificielle [31].

On verra dans la littérature beaucoup d'autres concepts relatifs à l'aspect qualitatif du procédé dont on citera : les systèmes experts [32],[33] et les graphes d'influences ou graphes causaux [34].

3.4 Application de la méthode choisie

On vient de voir un certain nombre de méthodes qui permettent, selon les connaissances que l'on possède sur un procédé, d'élaborer un diagnostic et affirmer que le système est en fonctionnement anormal, voire même quel sous-système ou composant particulier est en cause. Cette connaissance peut être exploitée pour prendre un certain nombre de décisions de conduite en temps réel, quand elle est suffisamment précoce. Il s'agit tout d'abord de garantir la sûreté et ensuite de limiter les pertes de performances voir de tout ce qui est en cours de fabrication.

Souvent la conduite des systèmes sous défauts, possible si la sécurité n'est pas en jeu, est assurée par la régulation classique (commande robuste etc.). Par contre, des défauts plus sévères vont nécessiter des actions plus draconiennes. On parle alors de commande tolérante aux fautes évidemment avec dégradation des performances.

Dans cette optique, nous cherchons à maintenir le système en fonctionnement avec des performances les plus proches possibles du système nominal. Ce qui veut dire qu'on va s'intéresser au fonctionnement du système dans sa globalité sans se soucier de la localisation des éléments en cause de cette défaillance.

Nous avons jugé qu'un test statique reposant sur des seuils pré-établis pourrait suffire à notre phase de détection et garantir le fonctionnement du système autour du point nominal.

Nous retrouvons dans la littérature, des tests séquentiels qui traitent de façon continue les données et qui ne requièrent pas de séquences fixes d'échantillons dont le nombre est fixé à l'avance. L'avantage que nous voyons dans ces techniques réside dans la possibilité d'arrêter le test dès que le nombre d'échantillons est suffisant pour prendre une décision sans ambiguïté.

Notre choix s'est porté sur le test séquentiel de Wald [35] que nous allons développer dans ce qui suit.

3.5 Les tests séquentiels de Wald

Les tests séquentiels et plus précisément les tests séquentiels du rapport de probabilités, ont été introduits par le mathématicien Wald [35] pendant la seconde guerre mondiale.

Contrairement aux tests classiques, ces tests sont définis par récurrence sur le nombre d'observations, qui n'est pas donc fixé a priori. Wald a entre autre démontré que l'utilisation du test séquentiel du rapport des probabilités permettait souvent une économie moyenne d'au moins 50% sur le nombre d'observations par rapport à une procédure classique. Conséquence des travaux de Wald, de nombreux mathématiciens ont développé la théorie des tests séquentiels.

Nous allons dans cette approche, analyser en général les signaux issus du procédé (sorties, paramètres du système etc....) pendant son fonctionnement normal et on en déduit une loi de densité de probabilité pour chaque signal analysé. La détection consistera alors à déterminer ensuite en temps réel si le signal observé obéit bien à cette loi de densité, ou s'en écarte significativement, on parle dans ce cas de figure de dysfonctionnement.

Sachant qu'en général l'estimation des grandeurs telles que moyenne et écart type nécessite une fenêtre temporelle longue, on peut alors parler d'inconvénients des approches basées sur les décisions statiques, à l'exception de la méthode du test séquentiel de Wald qui se distingue des autres approches par son aspect économique (moins d'observations), définition des erreurs de décision et définition d'hypothèses liées au fonctionnement anormal en critères pratiques, ce qui justifie notre choix.

Les seuils qui permettent de déterminer que le signal suit son modèle sont, en général, fondés sur des tests statiques. On parle à ce moment là de tests d'hypothèses et la plupart du temps, pour une supervision ou encore surveillance, on compare deux hypothèses entre elles.

On notera H_0 l'hypothèse qui se réfère au cas de fonctionnement normal et on la compare à l'hypothèse H_1 de fonctionnement en défaut. On se retrouve donc devant quatre situations de décision, décrites par le tableau ci-dessous.

Désignons par, β la probabilité du manque à la détection et α la probabilité du taux de fausses alarmes dont les expressions sont données par :

$$\alpha = P(D_1 / H_0) \quad (3.1)$$

$$\beta = P(D_0 / H_1) \quad (3.2)$$

D_0 représente le domaine de décision relatif à la retenue de l'hypothèse H_0 .

D_1 représente le domaine de décision relatif à la retenue de l'hypothèse H_1 .

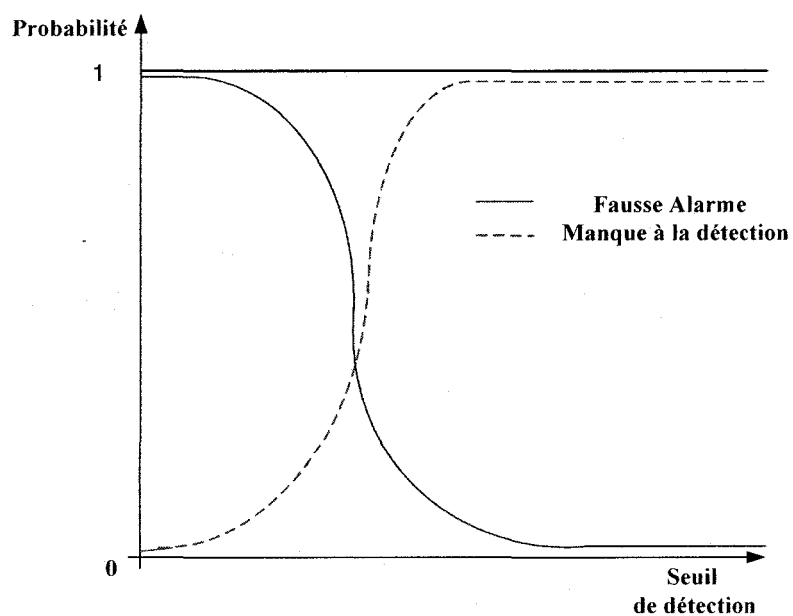
$P(.)$ désigne la densité de probabilité.

Tableau II

Décision statistique

Décision	Hypothèse (ou événement)	
	H_0 Vraie	H_1 Vraie
H_0 retenue	$P(D_0 / H_0) = 1 - \alpha$	$P(D_0 / H_1) = \beta$
H_1 retenue	$P(D_1 / H_0) = \alpha$	$P(D_1 / H_1) = 1 - \beta$

On voit d'après la figure 31, que plus le seuil de détection est faible plus on se dirige vers une fausse alarme alors qu'à l'opposé, plus le seuil est grand plus est probable le manque à la détection.

Figure 31 Erreurs de décision α et β

Nous allons dans notre cas faire le test sur la variable de sortie qui n'est autre que la vitesse de déplacement du vérin sur laquelle on veut prendre la décision quant à une défaillance ou pas de notre système hydraulique.

La méthode de détection en ligne que nous allons appliquer à notre système et plus précisément l'erreur de vitesse est basée essentiellement sur le suivi de l'évolution de l'erreur cumulative dans le temps qu'on note :

$$Cumsum(e) = \sum_{k=1}^N e_k \quad \text{avec} \quad e_k = x(k) - \hat{x}(k) \quad (3.3)$$

Où e_k représente l'erreur $e = x - \hat{x}$ à l'instant $t = N \cdot k$.

N représente le nombre d'observations.

L'avantage de raisonner par rapport à l'erreur cumulative dans le temps réside en la possibilité de déceler des variations de moyennes plus faibles et delà on peut parler de prédiction quant à la détection de l'erreur (tendance d'évolution).

3.5.1 Principe du test séquentiel de Wald

On suppose que l'on dispose d'un échantillon de l'erreur de sortie e_1, e_2, \dots, e_k obéissant à la loi normale de moyenne et de variance (θ, σ^2) avec σ connu, on veut alors tester au moyen du test séquentiel de Wald, l'hypothèse $H_0 : \theta = \theta_0$ contre l'hypothèse $H_1 : \theta = \theta_1$, avec $\theta_1 > \theta_0$.

On souhaite obtenir en tout temps :

$$\begin{aligned} P(D_1 / H_0) &\leq \alpha \\ P(D_0 / H_1) &\leq \beta \end{aligned} \quad (3.4)$$

A noter que les droites A_N (équation 3.5) et R_N (équation 3.6) définissent respectivement la zone d'acceptance et la zone de rejection comme le montre la figure 32.

On arrive à définir une bande qu'on appellera «zone de décision» délimitée par deux droites notées A_N et R_N pour lesquelles un raisonnement est établi comme suit :

Dés que l'un des points de coordonnées $(N, \sum_{k=1}^N e_k)$ sort de la bande de décision, on décide alors H_0 si A_N est franchie,

La décision pour H_1 si R_N est franchie,

Sinon, dans le cas où on se retrouve à l'intérieure de la bande, on pourra continuer le test.

$$A_N = \frac{\theta_1 + \theta_0}{2} * N + \frac{\sigma^2}{\theta_1 - \theta_0} \log \frac{\beta}{1 - \alpha} \quad (3.5)$$

$$R_N = \frac{\theta_1 + \theta_0}{2} * N + \frac{\sigma^2}{\theta_1 - \theta_0} \log \frac{1 - \beta}{\alpha} \quad (3.6)$$

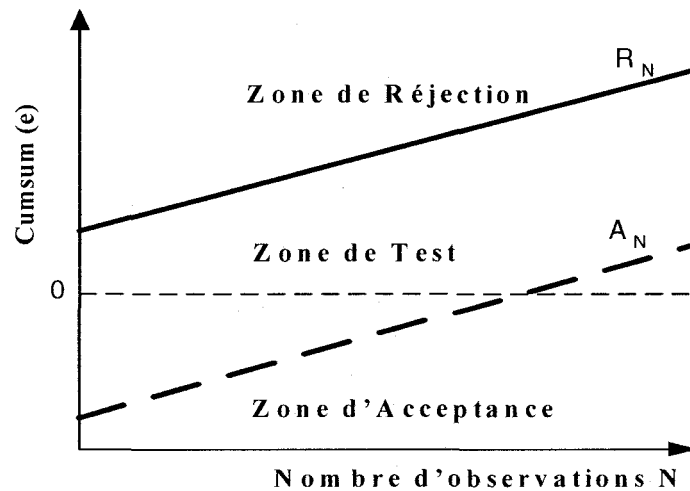


Figure 32 Zones de décision

3.5.2 Résultats de la simulation du test de Wald sur le système

Un des problèmes rencontrés pour l'application de la technique est le choix approprié des paramètres β et α qui dépendront essentiellement du niveau d'exigence observé sur le système et pour le processus. On a constaté que le facteur α , représentant la probabilité du taux de fausse alarme, précipite le rejet lors du diagnostic pour de grandes valeurs (le même raisonnement s'applique pour le facteur β) alors que l'écart type σ définit la largeur de la bande de test formée par les droites A_N et R_N .

La mise en œuvre de la procédure de test se déroule en plusieurs étapes :

- Choix des facteurs α et β ,
- Évaluation expérimentale des moyennes d'erreurs tolérées θ_0 et θ_1 ainsi que l'écart type σ ,
- Tracé des droites A_N et R_N en fonction du nombres d'observations,
- Prise de décision.

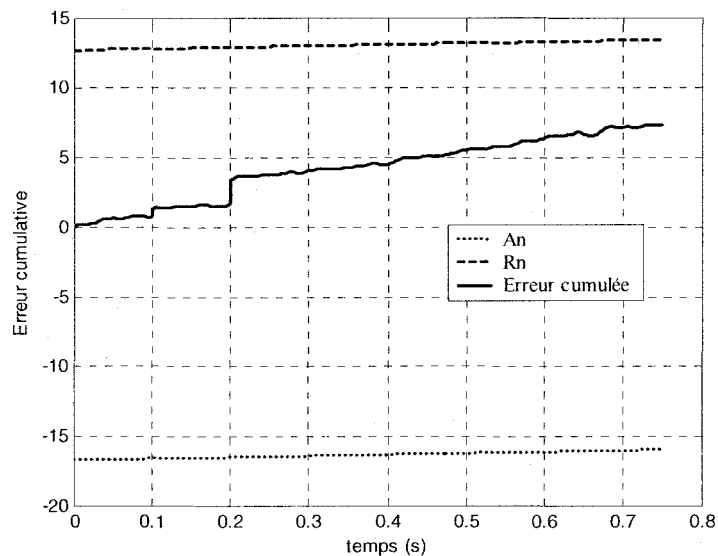


Figure 33 Test en mode normal

Les figures qui suivent représentent l'évolution du test séquentiel de Wald pour des types de défauts qu'on a rencontrés dans le chapitre 2. La figure 35 représente le suivi de l'erreur affectant la sortie du système (vitesse du vérin) via un bruit gaussien. On suppose que ce bruit obéit à une loi normale de moyenne nulle et d'écart type ($\mu = 0$, $variance = 0,0008$) comme le montre la figure 34.

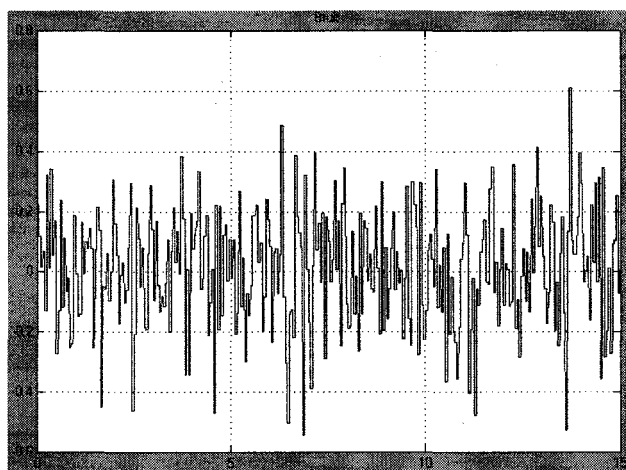


Figure 34 Exemple de bruit gaussien

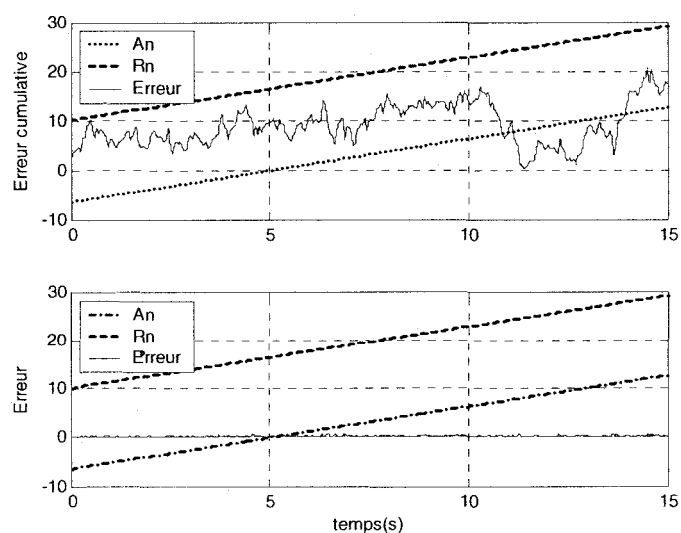


Figure 35 Détection d'un bruit en sortie

La figure 36 illustre l'évolution du test dans le cas du défaut de frottement visqueux pendant un intervalle de temps fixe. On voit que le test de Wald détecte bel et bien ce type de défauts et que l'erreur est acceptable après un certain temps du fait qu'elle franchit la zone de test pour se retrouver dans la zone d'acceptance (en dessous de la droite A_N).

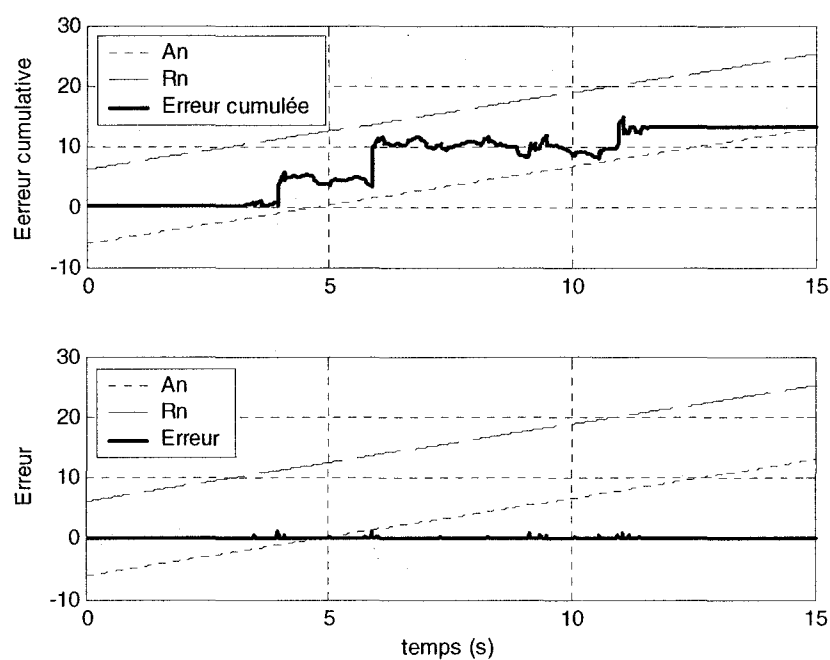


Figure 36 Détection de défaut de frottement

Et pour terminer, on voit d'après la figure 37 l'évolution de l'erreur dans le cas de défaut de pression d'alimentation brusque mais qui s'estompe après un certain temps d'où l'acceptation de cette erreur.

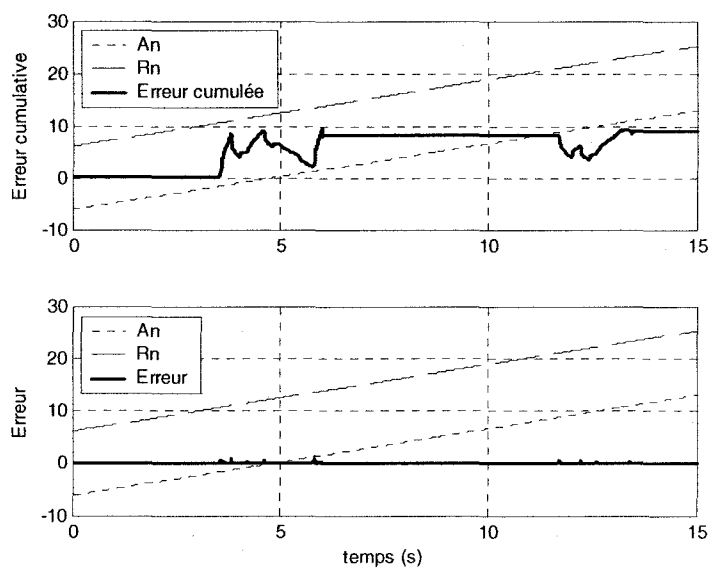


Figure 37 Détection de défaut de pression P_s

La figure 38 qui suit illustre le cas d'un défaut soldé par un rejet via le test de Wald, ce qui nous amène dans ce cas là à prendre une décision pour corriger le système (reconfiguration de la loi de commande).

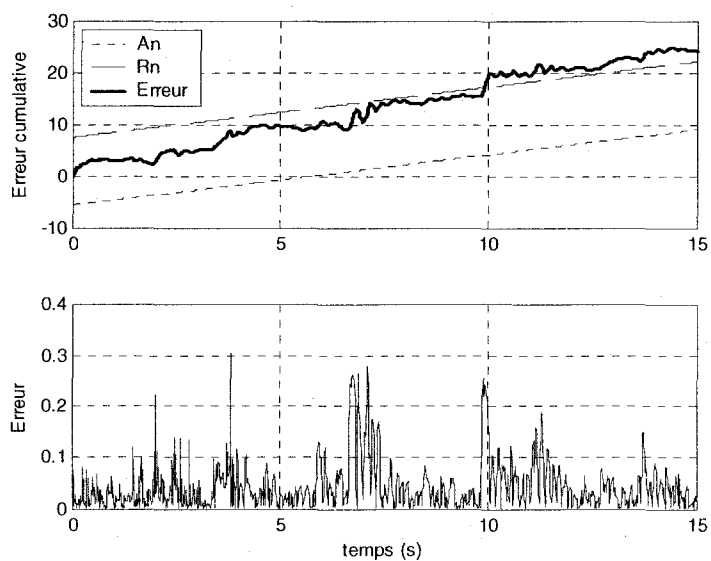


Figure 38 Cas de rejet

3.6 Conclusion

En conclusion, il est à noter que les résultats obtenus lors de la simulation et pour une multitude de défauts, confirme l'efficacité du test séquentiel de Wald pour détecter tout type de changement sur le fonctionnement du système aussi petit et bref qu'il soit. Et comme on l'a mentionné plus haut, le choix judicieux des facteurs α , β et σ selon les performances souhaitées ainsi que les tolérances acceptées, sera à considérer en se rapportant à la mission pour laquelle le système est désigné.

L'avantage que nous avons retrouvé dans le test séquentiel de Wald peut-être résumé comme suit :

- Le test se fait en temps réel,
- Le nombre d'observation (échantillons) n'est pas à déterminer au préalable,
- Le test s'arrête dès qu'il y a une décision à prendre (on se trouve dans l'une des zones externes d'acceptance ou de rejection),
- Efficacité de détecter tout type d'erreurs même les plus petites et brefs,
- Permet une détection précoce.

CHAPITRE 4

ACCOMMODATION AUX DÉFAUTS ET RECONFIGURATION DES LOIS DE COMMANDE

4.1 Introduction

Depuis les vingt dernières années, le sujet de la détection et la localisation des défauts dans les procédés industriels a été largement développé [2, 9, 36]. De nombreux chercheurs ont permis de développer des méthodes capables de résoudre ce problème. Cependant, dans certains systèmes complexes, comme dans l'aéronautique [37] ou les installations nucléaires, la détection de l'existence d'un défaut, qui est évidemment nécessaire, risque de ne pas être suffisante pour garantir la sûreté de fonctionnement de l'installation et la sécurité des opérateurs. Dans le cas où l'arrêt immédiat du fonctionnement du système est impossible (par exemple, un avion), il est indispensable de modifier la loi de commande existante afin de maintenir la stabilité du système et dans le pire des scénarios de le ramener à fonctionner en mode dégradé. On parle alors de l'accommodation aux défauts et de la reconfiguration des lois de commande. Dans la littérature, nous allons souvent rencontré le terme reconfiguration qui a été utilisé dans le cas de l'accommodation aux défauts anticipés [14] et le terme restructuration dans le cas de défauts non anticipés [38].

Nous insistons sur le fait que nous considérons seulement le cas de défauts critiques sans redondance matérielle. Le chapitre précédent nous a permis d'avoir une connaissance suffisante sur le système et le capteur logiciel (observateur) réagit très bien à toute déviation importante de la sortie. Dans ces conditions, nous considérons que toutes les interactions des différents composants sont prises en compte de façon statique.

4.2 Principe

Selon la gravité des défauts, la redondance matérielle existante, ...etc, une stratégie de reconfiguration de la loi de commande peut être mise en œuvre afin de retrouver les performances de régulation identiques ou du moins très proches des performances nominales. Dans le développement, les objectifs nominaux prédéfinis sont conservés; de la même façon le nombre de sorties à asservir ainsi que le nombre d'entrées de commande valides restent inchangés.

Notre stratégie repose sur le fait que, lorsqu'il n'est plus possible de préserver les performances en sortie du système, une stratégie de restructuration permet de commander le procédé en mode dégradé, en utilisant le meilleur compromis possible entre tous les objectifs nominaux et assure l'arrêt du système en toute sécurité dans un futur proche. Une modification de la structure du système est alors nécessaire. Par exemple, dans le cas d'une perte totale d'un actionneur ou d'un composant, l'asservissement de toutes les sorties ne peut plus être assuré; la restructuration pourrait consister à établir une priorité entre ces sorties.

Cette stratégie peut être illustrée sur l'exemple particulièrement sensible d'un avion présentant une panne d'actionneurs telle qu'un aileron de stabilisation inopérant (circuit hydraulique coupé). Le pilote peut alors décider d'une diminution de la vitesse afin de permettre un fonctionnement dégradé mais sécuritaire. Il est évident que cette vitesse ne pourra descendre en dessous d'un certain seuil minimal, dans ce cas, le pilote peut concéder une diminution de l'altitude qui, conjuguée à la baisse de vitesse, assure un fonctionnement "très dégradé" de l'appareil pour compenser les effets d'un défaut "très grave". Ce type de compromis est réalisable sur de nombreuses applications industrielles comme les processus thermiques chargés de produire un fluide ou un gaz à une température de sortie imposée, avec un débit donné, on peut établir une stratégie de

marche dégradée afin de maintenir la température voulue tout en abaissant le débit de production.

La configuration de la stratégie que nous avons adoptée, par analogie avec la commande adaptative [14], est représentée sur la figure 39 et comprend un module de diagnostic et un module de supervision. Cette structure permettra de :

- Traiter les différents types de défauts affectant un système.
- Donner une information sur l'état de fonctionnement du système.
- Renseigner sur la nécessité de prévoir ou non une accommodation du système.

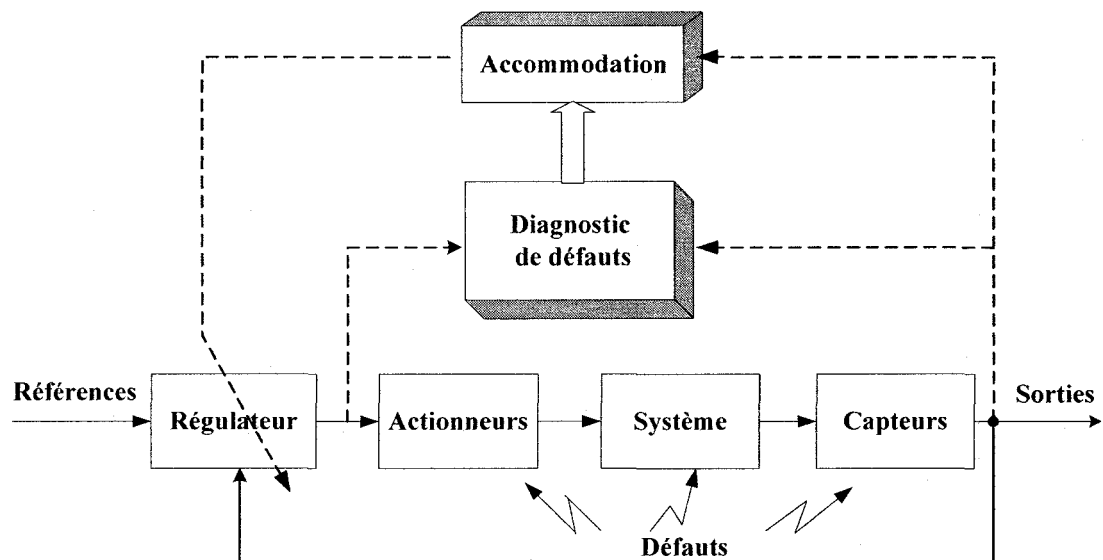


Figure 39 Schéma général d'une stratégie d'accommodation aux défauts

Avant d'aller en profondeur dans le développement de la méthode de reconfiguration de la loi de commande envisagée dans le cas de notre système, il serait intéressant de présenter quelques concepts et approches qui traitent de l'accommodation.

4.3 L'objectif d'une accommodation

Les lois de commandes tolérantes aux défauts englobent toutes les stratégies de commande capables de préserver au mieux certaines performances fixées par le concepteur voir même l'opérateur, non seulement en fonctionnement nominal mais aussi en régime défaillant, afin d'améliorer la sécurité et la fiabilité des processus. On citera les plus importantes de ces performances :

- La stabilité,
- La précision,
- La rapidité,
- L'erreur de poursuite (Tracking), etc.

La figure suivante illustre clairement l'objectif de l'accommodation qu'on peut résumer par une minimisation de la distance entre les performances réelles et celles désirées du système.

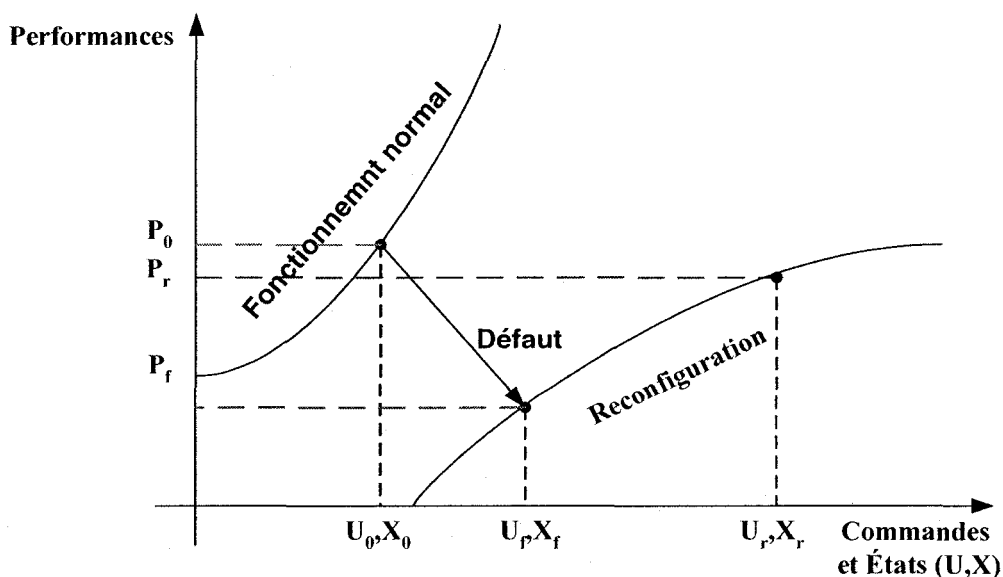


Figure 40 Objectif de l'accommodation

On voit d'après la figure 40, que si on considère un système opérant autour d'un point de fonctionnement nominal (U_0, X_0) et réalisant des performances P_0 , lorsqu'un défaut apparaît, le domaine de fonctionnement est modifié et il opère autour du point (U_f, X_f) , correspondant à des performances dégradées P_f . Il convient alors de modifier la loi de commande existante afin de retrouver un nouveau point de fonctionnement (U_r, X_r) où le système peut assurer des performances P_r assez proches des performances nominales P_0 .

4.4 Classification des stratégies d'accommodation

La stratégie à mettre en œuvre ainsi que le taux de performances retrouvées suite à des défauts, différeront suivant le type de processus (avion ou centrale nucléaire identifié, comme système à haut risque), le degré de redondance disponible, la gravité des défauts et inévitablement les performances à assurer obligatoirement.

Les travaux traitant le problème d'accommodation aux défauts ont permis de décomposer ces méthodes en deux classes principales : l'accommodation passive et l'accommodation active illustrées par la figure 41.

Les méthodes d'accommodation passive se fondent sur la connaissance a priori des défauts et sur une structure et des paramètres fixes du régulateur au cours du temps. Ce qui veut dire que la loi de commande est établie de telle sorte que le système puisse être tolérant aux défauts [5]. Les performances du système dépendent donc de la robustesse des lois de commande pré-établies. On retrouve les techniques de commande par stabilisation simultanée [4], de commande robuste (commande H_∞ , rejet de perturbation, etc.); ces techniques sont connues sous le nom de commande fiable (reliable control).

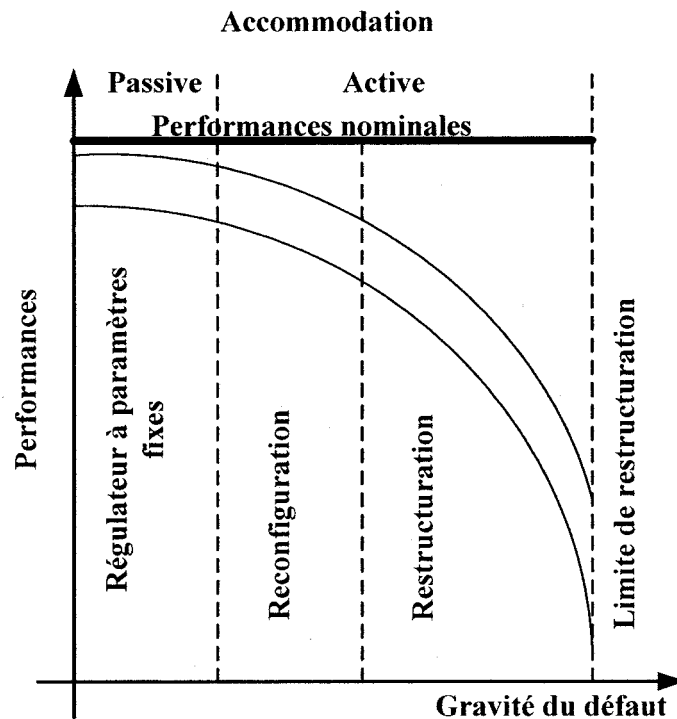


Figure 41 Classification des stratégies d'accommodation

Les méthodes d'accommodation active utilisent les techniques d'ajustement en ligne [14, 39](ou plus précisément en temps réel) des régulateurs de la boucle de commande. Elles se résument principalement en trois étapes essentielles :

- Une loi de commande nominale,
- Un module de diagnostic de défauts,
- Un module de reconfiguration de la loi de commande.

4.5 Les méthodes d'accommodation

Les méthodes d'accommodation ou de tolérance aux défauts sont donc des méthodes de commande en boucle fermée qui permettent d'assurer la stabilité du système ainsi qu'un niveau acceptable de performances même en présence de défauts.

Depuis ces deux dernières décennies, un intérêt particulier est porté aux techniques de tolérance aux fautes, essentiellement dans les systèmes à haut risque tels que les avions ou les centrales nucléaires et même dans les installations complexes comme les procédés chimiques. On voit donc que plus le degré d'automatisation est élevé plus est important l'utilisation de ces techniques d'accommodation.

Les différentes méthodes traitant de ce problème sont basées sur une redondance matérielle ou une redondance analytique. La première consistant en une commutation de l'élément défaillant à un autre similaire (ayant les mêmes fonctions dans le système); la redondance matérielle est avantageuse dans le cas d'un défaut critique comme la perte totale d'un capteur ou d'un actionneur. Cependant, il est évident que cette solution n'est pas la meilleure et parfois non réalisable pour les systèmes industriels vu les inconvénients qu'elle regroupe tels que : l'encombrement, les coûts élevés des composants et évidemment leurs coûts d'installation et de maintenance.

La redondance analytique apporte une solution intéressante au problème de tolérance aux défauts en évitant les inconvénients de la redondance matérielle. Les techniques utilisant la redondance analytique acquiert un modèle décrivant le comportement du système en question. Ce modèle peut-être analytique ou heuristique. On retrouve d'ailleurs dans la littérature les articles de Noura [40], Patton [36] et Zemlyakov [37] qui traitent sur l'état de l'art de commande tolérante aux fautes.

4.5.1 Méthodes heuristiques

Un système reconfigurable nécessite une grande flexibilité afin de s'adapter au plus grand nombre de situations imprévues. En effet, en présence de défauts, le système est amené à évoluer dans des zones de fonctionnement que l'on ne maîtrise pas et pour lesquelles on ne dispose pas toujours de modèle représentatif pour caractériser son

évolution. Dans ce cas, seule une approche heuristique permet d'apporter une solution au problème de la reconfiguration, et plus précisément en introduisant la notion d'apprentissage [15], [41], ou de systèmes experts [42], [16] et [43], ou encore à base de logique floue [44],[17]. Ces méthodes peuvent être regroupées dans le contexte de la commande "intelligente" et nécessite en général :

- L'évaluation des performances du système,
- La mémorisation des paramètres nouvellement calculés pour les différents points de fonctionnement,
- La réactualisation de la loi de commande.

4.5.2 Méthodes analytiques

Lorsque l'on dispose d'un modèle mathématique du procédé, on peut utiliser les techniques analytiques d'accommodation aux défauts afin d'annihiler les effets d'un défaut à la seule condition de pouvoir les quantifier. On retrouve parmi ces méthodes, les approches suivantes.

4.5.2.1 Accommodation par stabilisation simultanée

Faisant partie de la catégorie des méthodes passives, cette approche consiste à déterminer un seul régulateur capable de garder le système stable à chaque apparition de défauts. La stabilisation simultanée [4] répond à la question qui suit : étant donnés N systèmes décrivant le comportement de notre processus sur une large plage de fonctionnement, existe-t-il un régulateur $C(s)$ tel que le système en boucle fermée $T_i(s) = [I + C(s) * T_i(s)]^{-1}$, $i = 1 \dots N$ soit stable ($T_i(s)$ représente la fonction de transfert).

On considère que $T_1(s)$ représente le fonctionnement normal (sans défauts) et devient $T_2(s)$, $T_3(s)$, ... ou $T_N(s)$ en présence de défaillance.

Plusieurs chercheurs ont traité de la stabilisation simultanée des systèmes, Saeks et Murray [4] ont proposé un critère géométrique sauf que cette solution est difficile à mettre en œuvre dans le cas de systèmes d'ordre supérieur à deux et plus ($N > 2$). Noura [5] a proposé une méthode simple à mettre en œuvre, capable de stabiliser à la fois le système nominal et celui en faute pour un défaut connu à l'avance.

Il est bon de rappeler que cette méthode couvre des domaines d'applications limités à un nombre restreint de défauts anticipés du fait qu'on ne peut connaître tous les défauts pouvant affecter le système à l'avance. La figure 42 illustre l'approche.

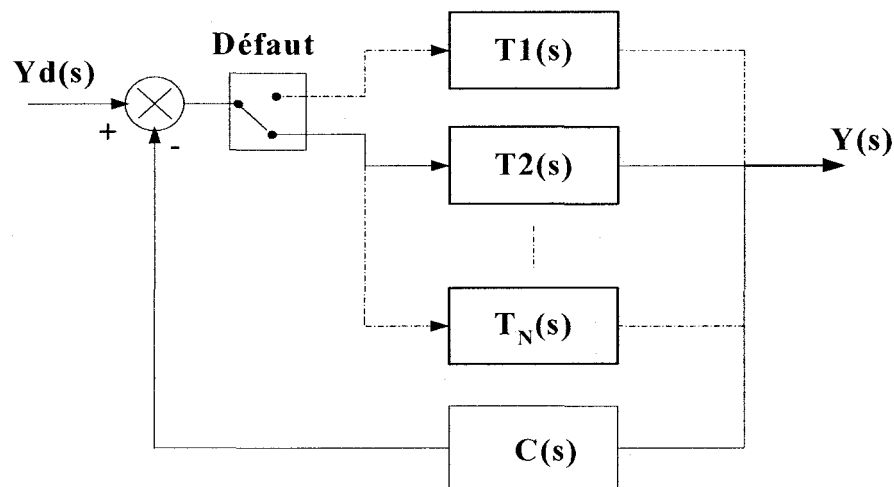


Figure 42 Principe de la stabilisation simultanée

4.5.2.2 Méthode de la pseudo-inverse (PIM)

La méthode de la pseudo-inverse (PIM) a été étudiée en simulation dans le domaine de l'aéronautique par Huber [11], Ostroff [12], Rattan [45]. Cette méthode est appelée

pseudo-inverse car elle nécessite le calcul de la pseudo-inverse de certaines matrices pour déterminer une nouvelle loi de commande. Son principe est d'ajuster le gain de retour afin que le système reconfiguré puisse s'approcher au mieux du système nominal (en fonctionnement normal). Le principal avantage de cette méthode réside dans la simplicité des calculs qu'elle nécessite et dans la facilité de sa mise en œuvre d'après Gao [46], [47].

Considérons un système nominal en boucle fermée représenté par la forme d'état suivante :

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx \\ u &= -Kx \end{aligned} \tag{4.1}$$

L'apparition d'un défaut sur ce système conduit à une modification de ses paramètres, il s'ensuit une nouvelle représentation d'états :

$$\begin{aligned} \dot{x}_f &= A_f x_f + B_f u_f \\ y_f &= C_f x_f \end{aligned} \tag{4.2}$$

D'où la nécessité de calculer la nouvelle loi de commande de telle sorte que la dynamique du système défaillant en boucle fermée soit égale à celle du système nominal [12].

$$\begin{aligned} u_f &= -K_f x_f \\ A - BK &= A_f - B_f K_f \end{aligned} \tag{4.3}$$

Une solution optimale pour retrouver K_f serait donnée au sens des moindres carrés par :

$$K_f = B_f^+ (A_f - A + BK) \tag{4.4}$$

où B_f^+ est donc la matrice pseudo-inverse de la matrice B_f .

On notera que la matrice de gains K_f peut être calculée à l'avance pour certains défauts connus et stockée en mémoire, d'où la possibilité, une fois le défaut détecté et identifié, de sélectionner le gain de retour adéquat.

On n'oubliera pas de mentionner les limites de cette approche qui est considérée comme une solution rapide pour ramener le système vers la stabilité, mais qui n'est pas malheureusement toujours garantie selon Rattan [45] ou encore Caglayan [48].

Pour pallier cet inconvénient majeur qu'est la stabilité, la méthode de la pseudo inverse modifiée (MPIM) a été proposée par Gao [47]. Cette solution a pour objectif principal de trouver le meilleur compromis entre la stabilité du système et les performances du système défectueux.

4.5.2.3 Accommodation par commande adaptative

Ces méthodes semblent être naturelles pour résoudre le problème d'accommodation aux défauts. En effet lorsqu'un défaut apparaît, il entraîne la modification des paramètres du système et par identification de ces deniers en ligne, on peut déterminer les nouveaux paramètres de notre régulateur. On retrouve les méthodes tels que : la commande adaptative avec modèle de poursuite explicite, implicite ou encore commande auto-réglable.

La méthode par poursuite de modèle explicite consiste à minimiser au sens des moindres carrés l'erreur entre la sortie du modèle et la sortie du système. Par approche implicite, le critère de minimisation porte sur les trajectoires suivies par les composantes du vecteur d'état et non sur les sorties (minimisation d'un critère quadratique).

De nombreuses études ont été menées dans ce cadre là et ont permis de tester ces méthodes en simulation dans le domaine de l'aéronautique dont on citera les travaux de Zaid [14], Dittmar [49] et Ochi [38].

Bodson et al. [13] proposent trois algorithmes distincts pour l'accommodation aux défauts fondés sur la commande adaptative :

- Une commande adaptative indirecte utilisant l'estimation paramétrique et un algorithme des moindres carrés,
- Une commande adaptative directe à erreur de sortie,
- Une commande adaptative directe à erreur d'entrée.

L'auteur précise que l'application de ces techniques sur un avion a donné de bons résultats, et en particulier le dernier algorithme. Mais les différentes situations étudiées ne faisaient intervenir que des défauts peu sévères et sans bruit.

4.5.2.4 Accommodation par placement de pôles adaptatif

Cette approche repose sur l'idée suivante : pour que le système reconfiguré (système en faute) présente les mêmes performances que le système nominal, on détermine le nouveau gain K_f , de telle sorte que les pôles du système, en boucle fermée après reconfiguration, soient égaux à ceux du système nominal. Autrement dit, on détermine la nouvelle matrice de gain K_f [50] telle que :

$$\lambda_c(A_f - B_f K_f) = \lambda_c(A - BK) \quad (4.5)$$

Où $\lambda_c(.)$ représente l'équation caractéristique de la matrice $(.)$.

L'un des inconvénients majeurs que présente cette technique est le temps de calcul de l'algorithme d'identification pour converger. Une solution a été apportée en introduisant une entrée auxiliaire utilisée pour identifier le système défectueux pendant un laps de temps prédéfini. L'amplitude de ce signal doit rester suffisamment faible afin de ne pas altérer le fonctionnement du système. Ce qui permet alors d'accélérer la convergence de l'algorithme. La loi de commande s'écrit alors :

$$u_f(k) = -K_f x_f(k) + v(k) \quad (4.6)$$

Où $v(k)$ représente l'entrée auxiliaire.

4.5.2.5 Accommodation par des techniques multi-modèles

La plupart des stratégies d'accommodation aux défauts ont été développées dans le cas de modèles linéaires. Certaines des techniques citées précédemment, pourraient être appliquées à des systèmes non-linéaires en utilisant par exemple la linéarisation entrée/sorties. Mais la commande non-linéaires reste difficile à mettre en œuvre sur des systèmes complexes du fait que le modèle non linéaire les représentant reste très difficile, voire impossible, à obtenir.

Une autre démarche, qui attire l'attention de nombreux chercheurs pour résoudre ce problème, consiste à utiliser ce qu'on appelle les techniques multi-modèles pour l'accommodation dans les systèmes non-linéaires.

En effet, ces techniques permettent de commander un système non linéaire sur une large zone de fonctionnement décomposée en plusieurs zones linéarisées autour des différents points de fonctionnement possibles. Evidemment, ce qui ressort de cette approche, réside en la possibilité d'appliquer les méthodes valides dans le cas des systèmes linéaires. On

retrouve alors, une méthode d'accommodation aux défauts basée sur une commande adaptative par multi-modèles synthétisée par Maybeck [6].

La loi de commande est déterminée à partir de n commandes correspondant chacune à une situation probable H_i . Evidemment, le premier modèle représente le fonctionnement normal du système, tandis que les autres situations vont caractériser le système en cas de défaut. La figure 43 illustre le schéma général d'une commande par multi-modèles [51].

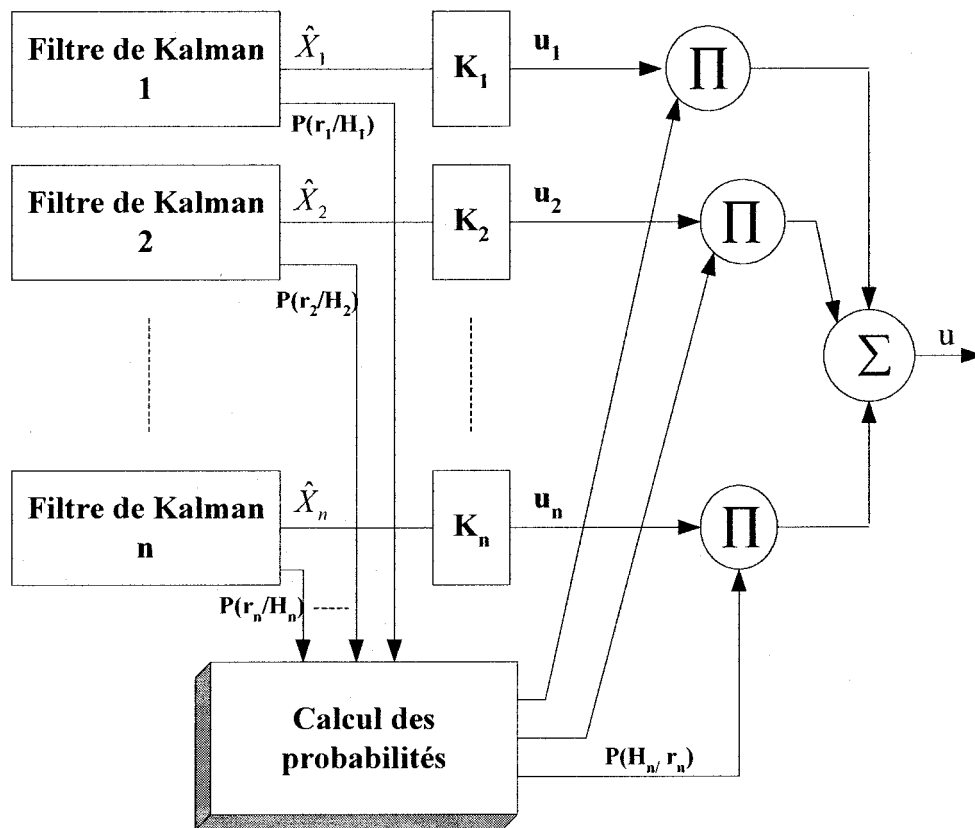


Figure 43 Architecture de la commande par multi-modèles

Les gains K_i sont calculés à l'avance pour chacun des modes de fonctionnement tandis que la commande u_i , qu'on nomme commande locale, se calcule par la relation classique :

$$u_i = K_i \hat{X}_i \quad (4.7)$$

\hat{X}_i étant l'estimation de l'état du système à partir du $i^{\text{ème}}$ filtre du banc de filtres de Kalman. Une unité de calcul des probabilités permet de retrouver les hypothèses $P(H_i / r_i)$, selon la formule de Bayes :

$$P(H_i / r_i) = \frac{P(H_i) P(r_i / H_i)}{\sum_{i=1}^n [P(H_i) P(r_i / H_i)]} \quad (4.8)$$

Où $P(r_i / H_i)$ correspond à la probabilité conditionnelle de r_i issue du $i^{\text{ème}}$ filtre de Kalman. Ainsi la loi de commande s'écrit :

$$u = \sum_{i=1}^n u_i P(H_i / r_i) \quad (4.9)$$

Cette méthode requiert le calcul a priori des gains des régulateurs correspondants à des situations connues du système en cas de fonctionnement normal ou en défaut.

Une étude fondée sur la définition des modes opératoires du système et d'une structure multi-régulateurs a été proposée par Charbonnaud [39]. Le principe d'accommodation aux défauts consiste en une détection du mode opératoire effectif et une sélection en ligne du régulateur adéquat. Cette technique montre une analyse de la stabilité et l'amélioration des performances du système lors du passage d'un régulateur à un autre.

4.6 Les limitations de l'accommodation aux défauts

La gravité du défaut et la structure du système sont les principales caractéristiques qui permettent d'établir une stratégie d'accommodation aux défauts ; autrement dit, la possibilité de reconfiguration d'un système est limitée par la redondance d'actionneurs et par les concessions que l'opérateur peut accepter au niveau des performances du système en faute (ou dégradé). D'ailleurs, la démarche qu'adopte l'opérateur en pratique, pour accommoder le système, fait appel à une connaissance plus physique que mathématique du système. La nature des objectifs à atteindre et le type de défaut conditionnent également ses actions.

La stratégie dans ce cas précis, sera de pouvoir choisir de nouvelles consignes pour le maintien d'un niveau de performance acceptable tout en affectant des niveaux de priorités aux grandeurs de sortie du système [17].

La limite de reconfigurabilité d'un système est donnée par la figure 44 ci-dessous :

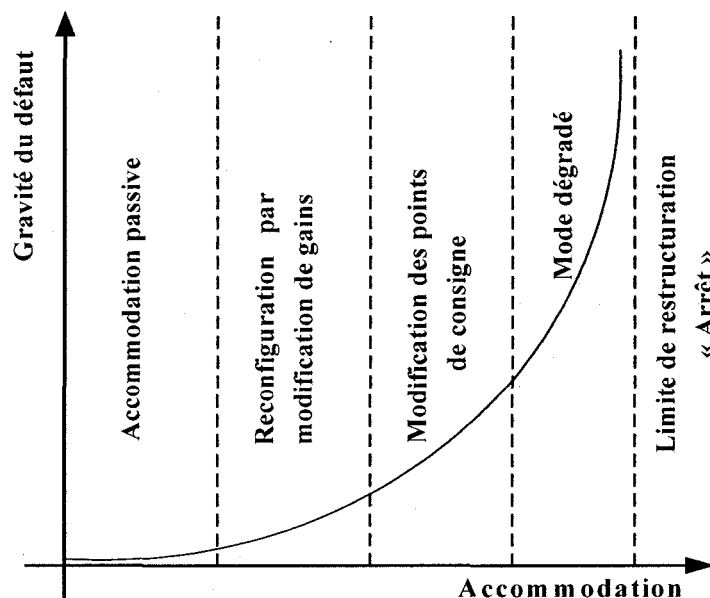


Figure 44 Limite de reconfiguration

A noter aussi, que pour la plupart des méthodes vues précédemment, un problème de taille demeure présent et réside dans le temps de calcul pour l'élaboration d'une nouvelle loi de commande.

Les algorithmes d'accommodation adaptative n'assurent pas malheureusement la stabilité du système global en tout temps du fait aussi que la loi de commande peut ne pas être réalisable physiquement ou encore exige une forte sollicitation de l'organe de commande (oscillations non négligeables). Mais aussi l'apparition des problèmes inhérents au diagnostic tels que les taux de non détection, de fausses alarmes et de retard à la détection.

Suite à ce survol des différentes approches d'accommodation et de leur limitations, nous jugeons plus approprié l'usage de la méthode heuristique pour notre étude.

4.7 Elaboration de la reconfiguration de la loi de commande par la méthode heuristique

Nous avons, à travers tout ce qui a été dit précédemment, jugé intéressant d'établir notre technique de reconfiguration sur une base heuristique. Selon le même raisonnement qu'utilise un opérateur en pratique, pour qui l'objectif visé est d'assurer la continuation du fonctionnement du système tout en évitant l'arrêt d'urgence et ses conséquences.

L'opérateur adopte une démarche qui fait appel à sa connaissance plus physique que mathématique et qui conditionne les actions qu'il entreprend selon la nature des objectifs à atteindre et évidemment le type de défaut qui affecte le système. Ce qui peut se référer à la commande intelligente (§ 4.5.1). L'essentiel de l'approche heuristique s'établira sur trois phases :

- L'évaluation des performances du système,
- La mémorisation des paramètres nouvellement calculés pour les différents points de fonctionnement,
- La réactualisation de la loi de commande.

En se basant sur les graphiques de la figure 41 et de la figure 44, la conception de notre contrôleur évoluera selon les performances souhaitées ainsi que les défauts tolérés. En d'autres termes, en premier lieu un régulateur pré-établi garantira le bon fonctionnement de notre système jusqu'à ce qu'on soit contraint de modifier dans la mesure du possible les paramètres du régulateur et comme dernière étape, avant de se diriger vers l'arrêt d'urgence, la solution ultime qui se traduira par une restructuration qui consiste en la modification des consignes en vu de maintenir le système en fonctionnement dans un mode dégradé. La tâche n'était pas aussi facile car une reconfiguration de la loi de commande nécessite une connaissance qui se rapproche le plus possible du comportement de notre système. À partir de cette connaissance, nous pouvons évaluer les performances de notre système et surtout délimiter les zones représentant les niveaux de gravité les plus pertinents (figure 41).

Lors de la simulation du système hydraulique en boucle ouverte, nous avons remarqué que le système était assez stable. C'est d'ailleurs l'une des raisons qui a fait que beaucoup d'industries, qui utilisent ce type de système de positionnement hydraulique, portent généralement leur choix pour un régulateur PID. La régulation PID à retour de sortie (output feedback) a été à l'origine des progrès de l'ensemble des industries de procédés. Cette régulation qui a pu s'adapter aux procédés les plus divers (procédés chimiques complexes, etc.) grâce aussi à l'introduction de l'informatique durant les deux dernières décennies. Il est important de rappeler que les algorithmes de commande adaptative ont été appliqués dans les cas de défauts de faibles amplitudes entre autres les variations des paramètres du système ou la superposition de bruits additifs.

4.7.1 Evaluation des performances du système

Dans cette étape, nous avons simulé le système en boucle fermé à l'aide d'un PID classique dont les paramètres K_p , T_i et T_d ont été adaptés au fonctionnement du système en mode normal ; d'ailleurs le régulateur ainsi établi constituera notre commande nominale pour le système hydraulique.

Dans la mise au point de la boucle de régulation fermée, on choisit le point de fonctionnement autour duquel se retrouvent les conditions et les situations les plus probables. Le réglage aux paramètres K_p , T_i et T_d mis au point selon l'approche Ziegler-Nichols, permet une régulation assez efficace en terme de précision, rapidité et stabilité. La loi de commande est donnée comme suit :

$$u = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{d}{dt} e(t) \right] \quad (4.10)$$

Cette formulation de la loi de commande est basée sur le fait que nous avons considéré un modèle global des fautes en sortie $e(t)$. Ainsi nous estimons que les fautes additives et multiplicatives des capteurs seront prises en compte.

Notre choix pour un PID, de l'avis de plusieurs utilisateurs qui confirment le comportement quasi-linéaire des systèmes hydrauliques, a été validé par les tests que nous avons effectués pour différentes consignes. La mise au point de ces paramètres développé par Ziegler et Nichols a donné de bons résultats pour les paramètres du PID suivants $K_p = 0.55$, $T_i = 15$ et $T_d = 0.005$. Ces paramètres seront ajustés dans la phase de mémorisation.

La simulation du système en mode normal est présentée sur la figure 45.

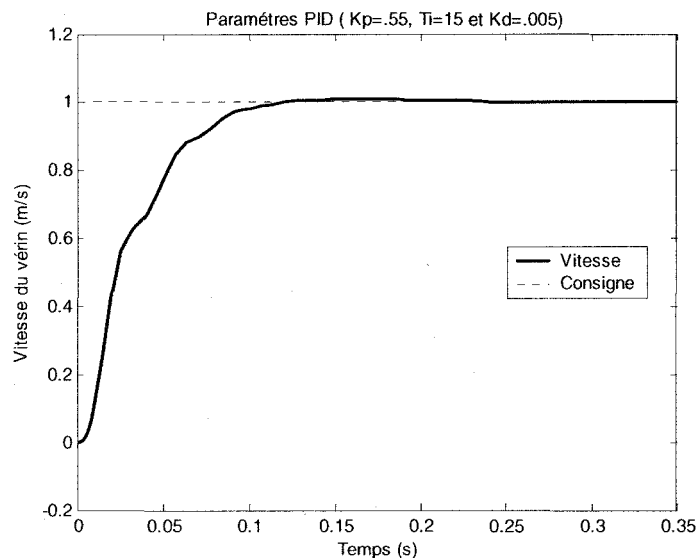


Figure 45 Réponse du système en mode normal

4.7.2 Mémorisation des paramètres nouvellement calculés

Dans cette partie, nous allons donc adapter les paramètres du PID pour faire face aux différents cas de défauts et les mémoriser afin de les utiliser pour corriger la réponse du système.

Nous allons évaluer les performances de notre système (réponse en sortie) à travers les défauts les plus plausibles qu'on a énumérés aux chapitres 1 et 2. Hélas, on ne pourra pas cerner tous ces défauts quoiqu'en pratique, l'apport d'une expertise dans les différentes applications pourrait être d'une grande utilité pour la mémorisation et la modélisation du système en défaut surtout lorsqu'on parle de défauts critiques. C'est pour cela, que dans le cas académique nous allons focaliser sur le pourcentage de l'erreur de sortie, et simuler quelques types de défauts en vue d'évaluer l'action à entreprendre.

Nous voulons aussi revenir sur l'idée de base qui nous a amené à opter pour cette méthode et qu'on peut expliquer par le fait que l'utilisation du modèle non-linéaire reste avantageuse pour les fonctions principales entre autres la détection et le diagnostic de défauts. Car le problème de linéarisation du système autour d'un point d'équilibre nécessite une certaine robustesse structurelle et que dire alors dans le cas où le système opère dans le cas d'un défaut sévère.

Les résultats obtenus dans le cas de quelques défauts tels que : défaut de pression, défaut de frottement ou encore un défaut dans la servovalve sont représentés dans les figures suivantes :

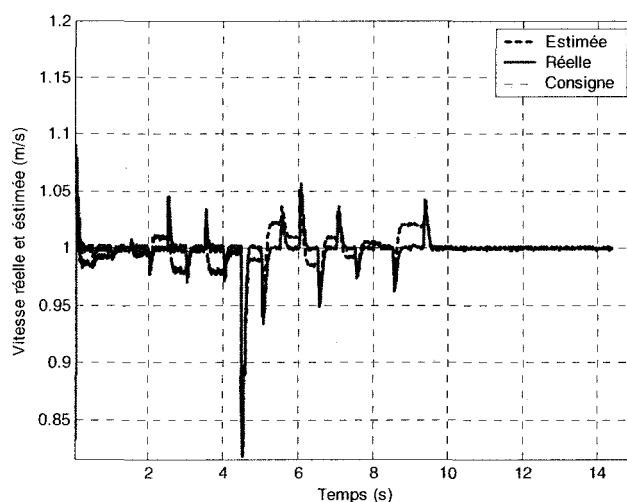


Figure 46 Adaptation du PID dans le cas de perte de pression

Dans le cas de perte de pression d'alimentation, les figures 46 et 47 illustrent l'effet du défaut sur la vitesse du vérin (figure 46), pendant que le test de Wald confirme par son diagnostic un mauvais fonctionnement du système (figure 47). On voit tout cela pendant l'intervalle de temps compris entre 3 et 9 secondes.

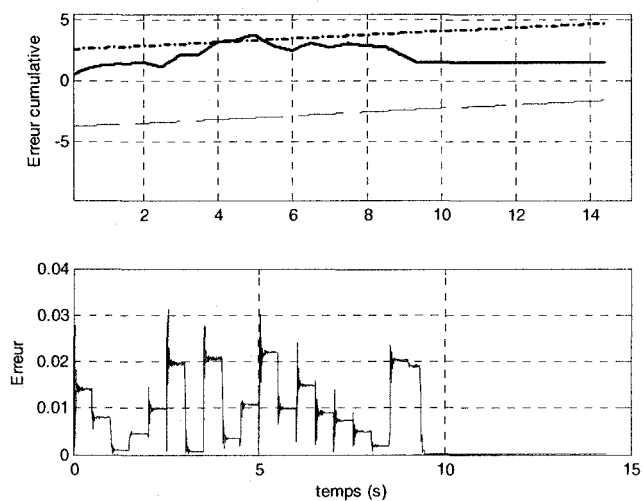


Figure 47 Évolution du test de Wald (perte de pression)

Par la suite l'adaptation des paramètres du régulateur replace la sortie selon la consigne (vitesse) désirée pendant l'intervalle de temps compris entre 9 et 15 secondes. Les nouvelles valeurs des paramètres du PID sont : $K_p = 1.3$, $T_i = 45$ et $T_d = 0.02$.

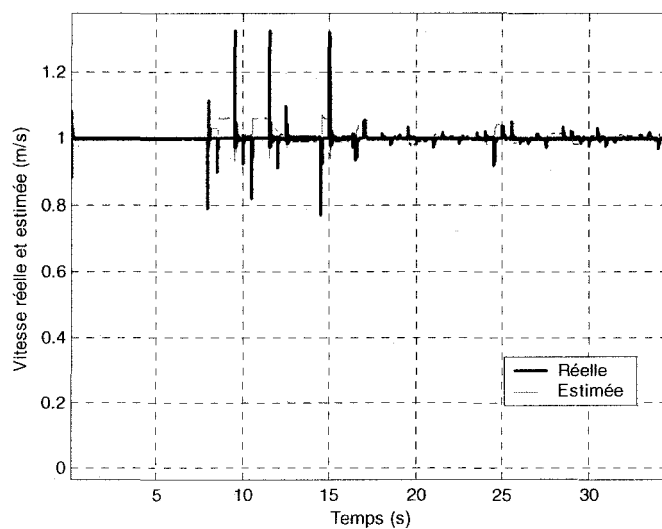


Figure 48 Adaptation du PID (défaut de frottement)

L'effet du défaut de frottement dans le piston du vérin est représenté par les figures 48 et 49 où on aperçoit un mauvais comportement du système détecté et diagnostiqué à travers le test de Wald. Une nouvelle fois, l'adaptation des paramètres du régulateur a permis de corriger le système et le ramener à la valeur de sortie désirée.

Les nouveaux paramètres du PID ont donné les valeurs suivantes $K_p=0.95$, $T_i=75$ et $T_d=0.1$.

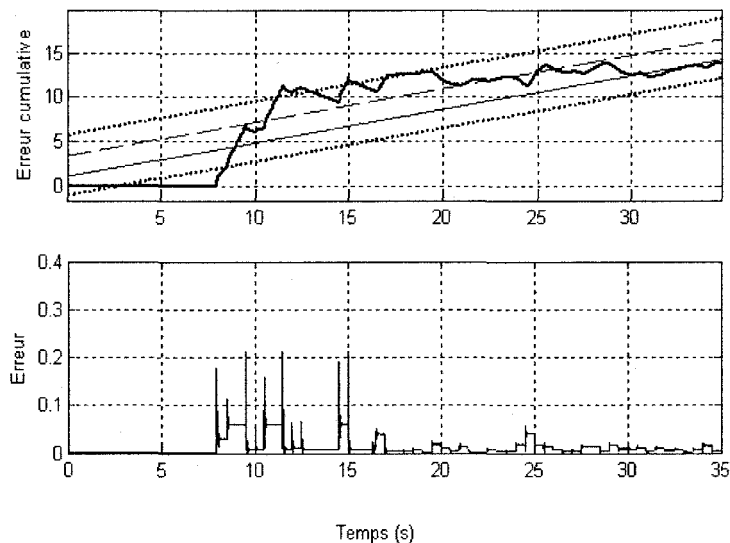


Figure 49 Évolution du test de Wald (défaut de frottement)

4.7.3 Réactualisation (reconfiguration) de la loi de commande

L'idée qu'on a retenue pour arriver à une reconfiguration de la loi de commande s'intéresse beaucoup plus aux cas de défauts critiques pour lesquels quelques actions sont à prévoir parmi eux :

- Un ajustement des paramètres du contrôleur,

- Une modification du point de consigne dans le but de stabiliser le système à une valeur acceptable de la sortie dans le cas où il est impossible d'atteindre la consigne souhaitée et par crainte de conduire le système vers l'instabilité.

Par analogie avec les seuils d'alarmes classiques utilisés par les systèmes d'arrêt d'urgence, nous avons pensé à établir des seuils de décisions basés sur les connaissances empiriques et heuristiques de notre système hydraulique et introduits dans le test séquentiel de Wald, comme le montre la figure 50.

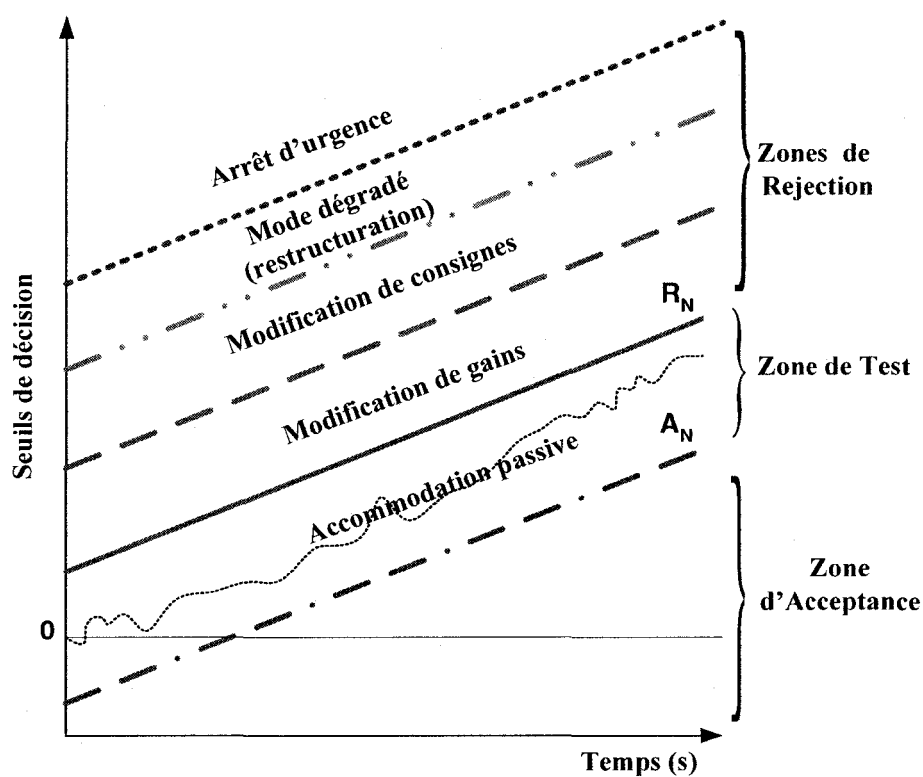


Figure 50 Seuils d'aide à la décision

Ces différents niveaux de seuils seront fixés selon les performances souhaités dans le cadre de la mission pour laquelle le système est choisi. Dans notre cas, on s'est intéressé à une marge d'erreur de poursuite (erreur entre l'observateur et le modèle original) qu'on compare aussi à la réponse du système (erreur de sortie).

La mise au point automatique ou l'adaptation de la commande (paramètres du PID), sera réalisée par un programme qui doit fournir en tout temps la commande à appliquer au système selon les résultats fournis par les modules de détection et de diagnostic. Et tout cela sur la base de connaissances initialement fournie par une banque de PID définis hors ligne. Nous avons dans notre étude mis l'accent sur les deux zones identifiées par "modification des gains" et "modification des consignes" qui ont retenu notre attention.

Les zones identifiées comme étant les "mode dégradé ou restructuration" et "arrêt d'urgence", nécessitent une reconfiguration plus poussée qui requiert une connaissance approfondie du comportement du système ainsi que son domaine d'utilisation.

Les trois modules qui forment notre système de reconfiguration, entre autre la commande, la détection et le diagnostic, ont leur propre traitement indépendamment des deux autres ce qui permet de réduire le temps de calcul.

Pour terminer nous présentons ici un cas qui nécessite une action fondée sur la connaissance du système et sur ses capacités. C'est le cas d'un défaut du système où le contrôleur n'a pu corriger le système en faute et par conséquent la solution envisageable se concrétise par la modification de la consigne afin de limiter l'effet du défaut, comme le montre la figure 51.

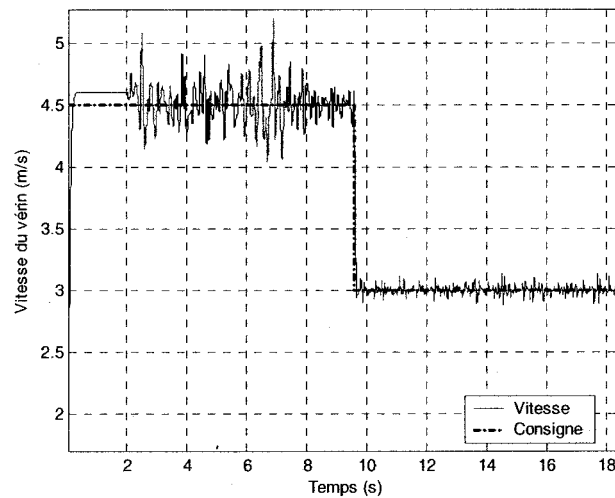


Figure 51 Cas de changement de consigne

Remarque : L'approche par la méthode pseudo-inverse aurait probablement donné des résultats exploitables, Mais elle n'a pas été retenue pour plusieurs raisons :

- Le gain de contre-réaction calculé pour assurer la stabilité du système en boucle fermée est déterminé autour d'un point de fonctionnement du système. Il y a risque d'instabilité quand ce point de fonctionnement change,
- Ce gain ne tient pas compte de la non-disponibilité des capteurs,
- La matrice inverse est calculée d'avance seulement pour des défauts connus,
- Pour certains défauts non-anticipés, la stabilité du système n'est pas garantie.

4.8 Conclusion

Dans cette partie, nous avons mis en évidence l'importance d'une étape d'accommodation aux défauts qui ne peut pas toujours être assurée par une commande classique ou même parfois par une commande adaptative dans le cas des systèmes

fortement non-linéaires ou encore pour des systèmes complexes dont les connaissances sont limitées (modèle analytique inexistant).

Notre solution reposait essentiellement sur la prise de décision évaluée à travers les performances de notre système (réponse en sortie) ou encore les modes de fonctionnement dans lesquels il opère. Comme le montre la figure 50, les seuils de décision nous permettent de situer l'état de fonctionnement du système selon les zones pré-établies expérimentalement via ses performances et son comportement. Selon le degré de dégradation du système défaillant, on a utilisé deux solutions : la première relative à la zone "modification des gains" où les paramètres du PID sont réajustés selon les performances évaluées auparavant tandis que pour la seconde solution, qui traite le cas d'une dégradation plus importante représentée par la zone "modification des consignes", on opère avec un changement de consigne, qu'on peut identifier par un mode dégradé, dans le but d'éviter l'arrêt d'urgence.

Nous n'avons pas traité malheureusement (faute de temps), dans cette étude, des approches numériques pour illustrer une méthode de reconfiguration bien précise. Notre intention était de montrer l'importance de la reconfiguration pour accommoder le système dans ses phases de dysfonctionnement et de présenter, sans être exhaustif, quelques cas de défauts du système qui peuvent s'avérer pertinents. Il est primordial de fixer les critères tels que la dimension de l'installation (systèmes et sous-systèmes), la dynamique du système et la robustesse des outils de diagnostic utilisés et enfin les performances souhaitées.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Le travail que nous venons de présenter a été motivé par la nécessité de développer des lois de commande tolérantes aux fautes pouvant affecter un système. La reconfiguration des lois de commande en présence de défauts est une solution qui a pour objectif le maintien du système en fonctionnement (sans interruption) avec les performances les plus proches possibles (cas du mode normal), mais surtout d'assurer sa sûreté ainsi que de l'environnement qui l'entoure (vies humaines, infrastructures etc.). Pour arriver à concevoir une loi de commande reconfigurable, on a fait appel aux trois phases essentielles qu'on résume en : une loi de commande nominale, un module de détection et de diagnostic et enfin une modification de la loi de commande.

Le système hydraulique que nous avons étudié présente des non linéarités, ce qui est souvent le cas en pratique pour les processus industriels; delà, nous avons observé la nécessité de considérer le caractère non-linéaire de notre système pour deux raisons essentielles. Lors de la modélisation, et pour des points d'opérations, le modèle mathématique peut s'éloigner du comportement physique. Il semble évident que les méthodes linéaires ne sauraient répondre aux exigences de sûreté et de fiabilité que l'on peut attendre de notre module de détection pour la génération de résidus robustes et du module de diagnostic pour éviter les cas de fausses alarmes ou de non détection.

L'utilisation d'un observateur a été la clé pour la détection de défauts; d'ailleurs la théorie de stabilité de Lyapunov nous a permis de concevoir un générateur de résidus sensibles et robustes. Le module de diagnostic, basé sur les tests séquentiels de Wald (ou test de probabilités), a donné de bons résultats dont l'efficacité réside en sa capacité à déceler les petites et/ou brèves variations, mais surtout la possibilité de prédiction qui n'est pas à négliger et enfin son application en temps réel (nombres d'observations non requis).

L'approche heuristique que nous avons choisi a permis de sélectionner des plages de fonctionnement du système pour lesquelles l'état du système exige des actions mieux adaptées. Ces actions adaptées aux situations les plus probables permettent de limiter la sollicitation excessive des actionneurs ce qui leur assure une durée de vie acceptable mais aussi une certaine stabilité en sortie.

Avec cette approche, nous avons voulu devancer les actions des systèmes d'arrêt d'urgence, qui malheureusement ne sont là que pour emmener le système à une interruption sécuritaire. Mais aussi, les lois de commande adaptatives qui n'ont pas la capacité de vérifier l'état du système en cas de défauts critiques.

RECOMMANDATIONS

L'étude que nous avons menée n'a pas tenu compte de la redondance matérielle et des informations provenant de différents sous systèmes couplés à l'organe central de traitement d'information. En effet, de nouvelles méthodes de reconfiguration pour les systèmes avec redondance matérielle pourrait être élaborées. Dans ce sens, les travaux de recherche vont s'orienter vers la synthèse de loi tolérante aux fautes avec une commande nominale palliant les effets de perturbations et petits défauts et qui devrait être renforcé par une reconfiguration rapide afin de traiter la présence de défauts sévères.

Le problème imminent dans cette stratégie est entre autres lié à :

- La difficulté de traitement de l'information le plus rapidement possible vis à vis de la réponse du système,
- La compatibilité des «*drivers*» reliés aux différents capteurs,
- La nécessité de développement d'un agent double (un outil efficace d'expertise modélisée pouvant élucider les connaissances du système) de validation de la gravité des cas.

Le défi à relever serait de développer une stratégie de reconfiguration/restructuration des lois de commande permettant d'asservir les systèmes multi-variables. Elle servira à imposer une hiérarchie tant au niveau des sorties à contrôler que de la fiabilité des actionneurs contrairement aux autres méthodes classiques rencontrées dans la littérature.

ANNEXE

Programmes Matlab

Programme de simulation

```
clear all
clc
--- Initialisation des Paramètres de la station hydraulique---

fd=1600;
fd1=1850;
Ai=114*10^-5;
Ao=63*10^-5;
m=20;
Cd=.032;
w=.02;
beta=5e9;
beta1=4e9;
beta2=6e9;
Vi=.015;
Vo=.015;
Ksp=.00161;
tau=.033;
Pr=0;
Ps=7687e3;
Ps1=10e6;
```

Modèle simulink (en boucle ouverte)

```
sim ('Hydraulic_system3');    changer le temps de simulation en faisant CTRL + E
                               entrée échelon unitaire
```

États du système

```
X4= yout(:,1);    % Etat X4: Déplacement Xsp
X3= yout(:,2);    % Etat X3: Pression de sortie
X2= yout(:,3);    % Etat X2: Pression d'entrée
X1= yout(:,4);    % Etat X1: Vitesse
```

Tracé des graphiques

```
figure(1);

t=tout(:,1);
subplot(4,1,4);
plot(t,X4,'c');
```

```
ylabel('Etat X4');
grid;
```

```
subplot(4,1,2);
plot(t,X2,'g');
ylabel('Etat X2');
grid;
```

```
subplot(4,1,1);
plot(t,X1,'r');
title('Etats du système: X1(Vitesse),X2(Pin),X3(Pout),X4(Xsp)')
ylabel('Etat X1');
grid;
```

```
subplot(4,1,3);
plot(t,X3,'b');
ylabel('Etat X3');
grid;
```

```
figure(2)
plot(tout,X1,'r',tout,X2,'g',tout,X3,'b',tout,X4,'c')
grid
```

-----FIN-----

Observateur d'états

----- Entrée des valeurs du gains de l'Observateur -----

```
Ke=input(['Input the design vector: ']);
K1=Ke(1);          le choix des valeurs est arbitraire
K2=Ke(2);
K3=Ke(3);
K4=Ke(4);
Ke=[K1; K2; K3; K4];
```

Simulation du système modèle-observateur

```
sim ('Modele_Observer');          entrée échelon unitaire
```

----- Tracé des états réels et estimés -----

```
figure(1)
```

```
subplot(2,1,1);
plot(t,X4,t,Z4,'k--');
ylabel('Déplacement Xsp (m)');
grid;
```

```
subplot(2,1,2);
plot(t,X1,t,Z1,'k--');
ylabel('Vitesse du vérin (m/s)');
xlabel('temps (s)');
grid;
```

```
figure(2)
subplot(2,1,2);
plot(t,X3,t,Z3,'k--');
ylabel('Pression de sortie (Pa)');
xlabel('temps (s)');
grid;
```

```
subplot(2,1,1);
plot(t,X2,t,Z2,'k--');
ylabel('Pression d'entrée (Pa)');
grid;
```

----- Tracé des erreurs d'observation -----

```
figure(3)
subplot(2,1,1);
plot(t,X4-Z4,'k-');
ylabel('Erreur XSp');
grid;
```

```
subplot(2,1,2);
plot(t,X1-Z1,'k-');
ylabel('Erreur Vitesse');
xlabel('temps (s)');
grid;
```

```
figure(4)
subplot(2,1,2);
plot(t,X3-Z3,'k-');
ylabel('Erreur Pout');
```

```
xlabel('temps (s)')
grid;
```

```
subplot(2,1,1);
plot(t,X2-Z2,'k-');
ylabel('Erreur Pin');
grid;
```

----- FIN -----

Wald Sequential Test

```
clc
```

```
e1=X1-Z1;           Erreur en sortie
es1=X1-Ref;
CSe1=abs(cumsum(e1)); Erreur cumulative
```

```
Teta_zero=.1;%0.652(k=.9);%0.31(k=.95);
Teta_un=2*Teta_zero;
sigma1=.467;%0.363(k=.9)%0.172(k=.95);
sigma2=.8;
sigma=1.5;
```

```
Beta=.3;           % moins influent que Alpha.
Alpha=.5;          %Alpha grand, réjection précoce, vision 'Sévère' liée aux fausses alarmes.
```

```
% le choix de Alpha & Beta doit verifier:
% 1- Teta_zero <= mu_un
% 2- Teta_un >= mu_zero
[Teta_zero_error,sigma_error,muci,sci] = normfit(CSe1)
```

----- Tracé des droites Am (Acceptance) & Rm (Rejection) -----

```
mu_zero=Beta/(1-Alpha);
mu_un=(1-Beta)/Alpha;
```

```
Teta_m=(Teta_zero+Teta_un)/2;
Gamma=sigma^2/(Teta_un+Teta_zero);
```

```

SA=Teta_m*t+ 12*Gamma*log(mu_un);      Seuils de décisions
SB=Teta_m*t+ 7*Gamma*log(mu_un);

An=Teta_m*t+ Gamma*log(mu_zero);        Limite d'Acceptance
Rn=Teta_m*t+ Gamma*log(mu_un);          Limite de Rejection

e1=0;
CSe1=0;

for t=0:.1:20;
    An=Teta_m*t+ Gamma*log(mu_zero);
    Rn=Teta_m*t+ Gamma*log(mu_un);

    CSe1(t)=cumsum(e1);
    if (cumsum(e1)<An) | (cumsum(e1)>Rn)
        CSe1=0
    elseif (cumsum(e1)>An) & (cumsum(e1)<Rn)
        CSe1=CSe1(t)
    end
end

figure(1)
subplot(2,1,1);
plot(t,An,'g',t,Rn,'r',t,CSe1,'b',t,SA,'c',t,SB,'m');
ylabel('Erreur cumulative');
grid;

subplot(2,1,2);
plot(t,abs(e1),'k');
ylabel('Erreur');
xlabel('temps (s)')
grid;

```


Schéma du système Modèle-observateur sur Simulink

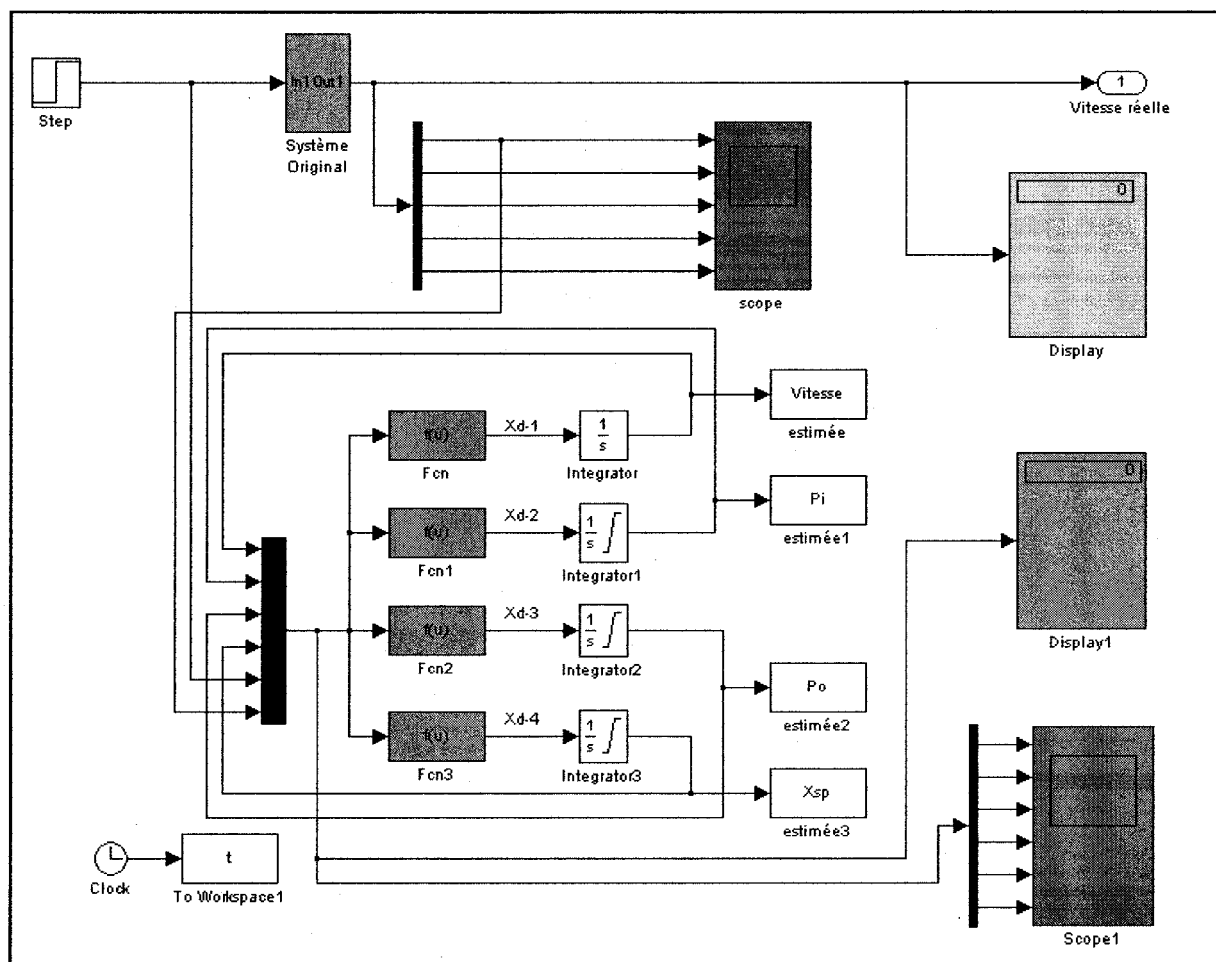
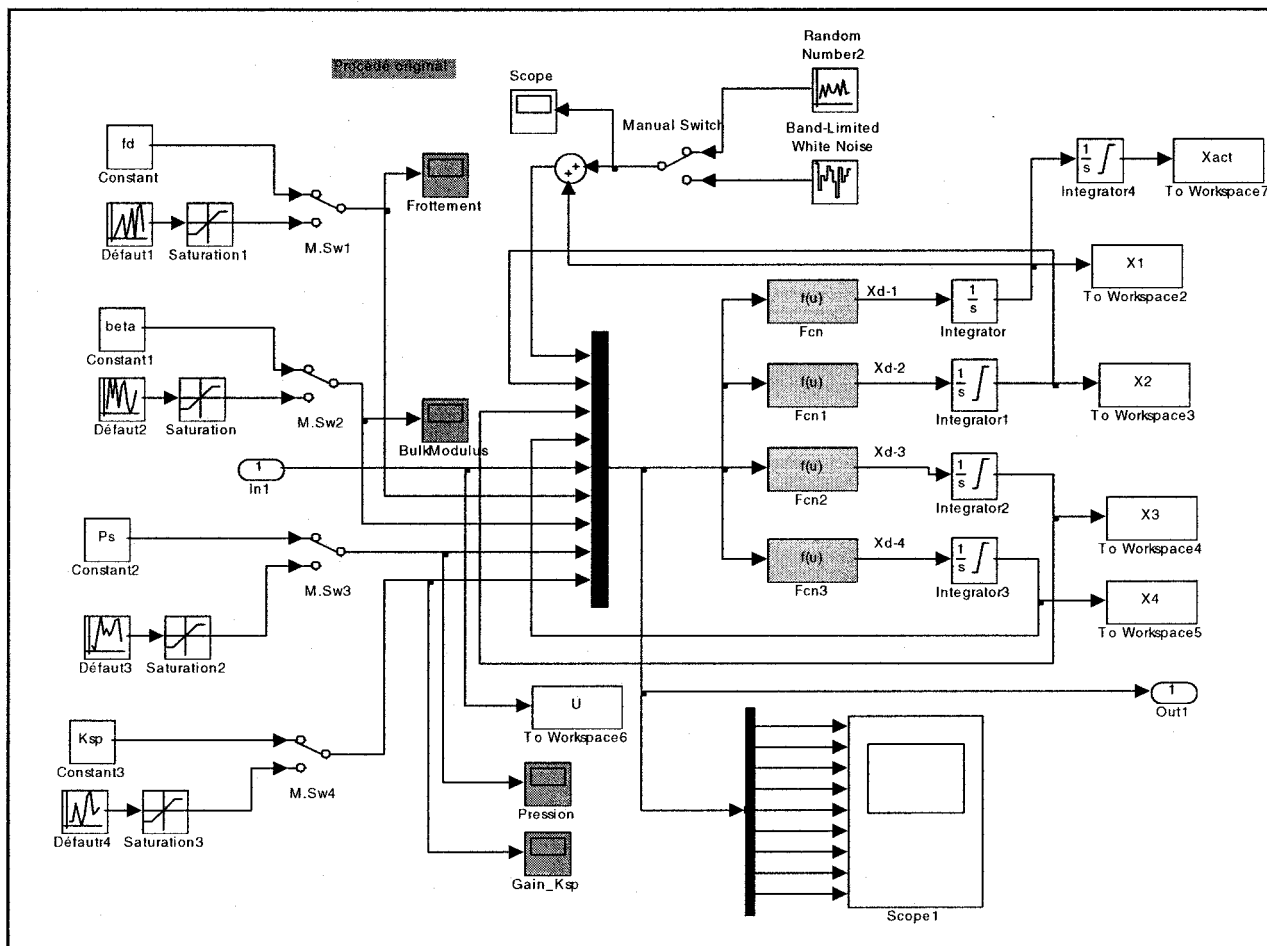


Schéma du système original



BIBLIOGRAPHIE

- [1] C. J. Patton R., "Observer based fault detection and isolation: Robustness and applications.," *Control Engineering Practice.*, vol. 5, pp. 671-682, 1997.
- [2] H. Noura, D. Sauter , Theilliol D., "Fault-Tolerant Control Method for Actuator and Component Faults," *IEEE Trans automatic control*, pp. 604-609, 1998.
- [3] R. Isermann, "Fault diagnosis of machines via parameter estimation and knowledge processing.," *Tutorial Paper Automatica*, vol. 29, pp. 815-835, 1993.
- [4] R. Saeks, J. Murray, "Fractional representation, algebraic geometry, and the simultaneous stabilization problem.," *IEEE Trans automatic control*, vol. 27, pp. 895-903, 1982.
- [5] H. Noura, C. Fonte, M. Robert . "Fault tolerant control using simultaneous stabilization.," *IEEE SMC'93 Conference., le Touquet-France*, 1993.
- [6] P. S. Maybeck, R.D Stevens, "Reconfigurable flight control via multiple model adaptive control methods," *IEEE Transactions Aerospace and electronics systems*, vol. 27, pp. 470-480, 1991.
- [7] S. H. Lane, R.F, Stengel, "Flight Control Design Using Non-linear Inverse Dynamics," *Automatica*, vol. 24, pp. 471-483, 1988.
- [8] J. D. Boskovic, S, Yu, R.K, Mehra, "A Stable Schema for Automatic Control, Reconfiguration in the presence of Actuator Failures," *Acc, Philadelphia*, 1998.
- [9] J. Gertler, *fault detection and diagnosis in engineering systems*: Marcel Dekker Inc., 1998.
- [10] R.Rajamani, "Performance of Active Automotive Suspensions With Hydraulic Actuators: Theory and Experiment," presented at Proceedings of The American Control Conference, Baltimore, Maryland, 1994.
- [11] R. R. Huber, B. McCulloch, "Self-repairing flight control system," *proc of the aerospace congress and exposition, SAE technical paper*, vol. series 841552, 1984.
- [12] A. J. Ostroff, "Techniques for accommodating control effector failures on a midly statically unstable airplane.," *proc of the american control conference ACC'85*, pp. 906-913, 1985.

- [13] M. Bodson, J. Groszkiewicz, "Multivariable adaptive algorithms for reconfigurable flight control.," *IEEE control system technology*, vol. 5, pp. 217-229, 1997.
- [14] F. A. Zaid, P. Ioannou., K. Goussman., R. Rooney, "Accommodation of failure in the F-16 aircraft using adaptive control.," *IEEE control system magazine*, vol. 11, pp. 73-84, 1991.
- [15] H. E. Garcia, A. Ray, R.M. Edwards, "Reconfigurable control of power plants using learning automata," *IEEE control systems magazine*, pp. 85-92, 1991.
- [16] R. Stengel, "Artificial intelligence theory and reconfigurable control systems.," *Dept of mechanical and aerospace engineering, university princeton*, vol. 1664, 1984.
- [17] C. Aubrun, D. Sauter, "Fault diagnosis and reconfiguration of systems using fuzzy logic," *international journal of systems science*, vol. 24, 1993.
- [18] R. J. Patton, "Fault-Tolérant Control Systems," *IEEE Trans automatic control*, pp. 1033-1054, 1997.
- [19] H. E. Merritt, *Hydraulic Control Systems*, 1967.
- [20] R. E. Kalman, "A new approach to linear filtering and prediction problems," *Trans ASME*, vol. 82, pp. 35-45, 1960.
- [21] D. G. Luenberger, "Observing the state of a linear system," *IEEE Trans. Mil. Electron*, vol. MIL-8, pp. 74-80, 1964.
- [22] R. Hermann, A.J Krener, "Nonlinear controllability and observability," *IEEE Trans. on Automatic control*, vol. 22, pp. 728-740, 1977.
- [23] D. G. Luenberger, "An introduction to observers," *IEEE Trans automatic control*, vol. 16, pp. 596-602, 1971.
- [24] P. Borne, Dauphin-Tanguy, *Commande et optimisation de processus*. Paris, 1990.
- [25] K. Ogata, *Modern Control Engineering*. New Jersey: Tom Robbins, 2002.
- [26] Kautsky, Nichols, Van Dooren., "Robust pôle Assignment in linear state feedback," *International journal of control*, vol. 41, pp. 1129-1155, 1985.

- [27] B. L. Walcott, S.H. Zak, "State Observation of non linear uncertain dynamical systems," *IEEE Trans automatic control*, vol. 37, pp. 166-170, 1987.
- [28] N. I. Basseville M, *Detection of abrupt changes*: Prentice Hall, 1993.
- [29] R. J. Maquin D., *Diagnostic des systèmes lineaires*. Paris, 2000.
- [30] B. Dubuisson, *Automatique et statistiques pour le diagnostic*. Paris, 2001.
- [31] G. M. Farreny H., *Elements d'intelligence artificielle, Traité des nouvelles technologies*. Paris, 1987.
- [32] K. A. Boullart L., "Application of Artificial Intelligence in Process Control," *Pergamon Press*, 1992.
- [33] G. Zwingelstein, *Diagnostic des defaillances, Theorie et pratique pour les systemes industriels*. Paris, 1995.
- [34] L. Leyval, Gentil S., Feray-Beaumont S., "Model based causal reasoning for process supervision," *Automatica*, vol. 30, pp. 1295-1306, 1994.
- [35] A. Wald, *Sequential Analysis*. New york, 1947.
- [36] R. J. Patton, "Fault-tolerant control: the 1997 situation," *In proc. of the IFAC safeprocess'97*, vol. 2, pp. 1033-1055, 1997.
- [37] S. D. Zemlyakov, V.Yu. Rutkovskii, A.V Silaev, "Reconfiguring aircraft control systems in case of failures.," *Automation and Remote Control*, vol. 57, pp. 1-13, 1996.
- [38] Y. Ochi, K. Kanai, "Design of restructurable flight control systems using feedback linearization.," *Journal guidance, Dynamics and control*, vol. 14, pp. 903-913, 1991.
- [39] C. Charbonnaud, F. Rotella, "Process operating mode monitoring switching on-line the right controller.," *IEEE Transactions on systems, Man and Cybernetics*, vol. C, pp. 77-86, 2001.
- [40] H. Noura, C. Aubran, F. Hamelin, "Accommodation aux défauts et reconfiguration des lois de commande.," *journal européen des systèmes automatisés*, vol. 30, pp. 1351-1374, 1996.
- [41] C. J. Paul, L.E. Holloway, D. Yan, "An intelligent reactive monitoring and scheduling system," *IEEE control system magazine*, pp. 78-86, 1992.

- [42] D. Handelman, "An application of artificial intelligence theory to reconfigurable flight control.," *Dept of mechanical and aerospace engineering, university princeton*, vol. 1665, 1984.
- [43] D. A. Handelman, R.F Stengel, "Combining expert system and analytical redundancy concepts for fault-tolerant flight control," *Journal of guidance, Dynamics and Control*, vol. 12, pp. 39-45, 1989.
- [44] D. Yixin, K.M Passino, "Stable fault-tolerant adaptive fuzzy/neural control for a turbine engine.," *IEEE control systems technology*, vol. 9, pp. 494-509, 2001.
- [45] K. S. Rattan, "Evaluation of control mixer concept for reconfigurable of flight control system," *Proc of the IEEE National Aerospace and Electronics conference.*, pp. 560-569, 1985.
- [46] Z. Gao, P. Antsaklis, "Pseudo-inverse methods for reconfigurable control with guaranteed stability," *Proc of the IFAC*, 1990.
- [47] Z. Gao, P. Antsaklis, "Stability of the pseudo-inverse method for reconfigurable control systems," *International journal of control*, vol. 53, pp. 717-729, 1991.
- [48] A. K. Caglayan, S.M, Allen, "Evaluation of a second generation reconfigurable strategy for aircraft flight control systems subjected to actuator failure and surface damage.," *IEEE National Aerospace and electronics Conf*, pp. 520-529, 1988.
- [49] C. J. Dittmar, "A hyperstable model-following flight control system used for reconfiguration following aircraft impairment," *proc of the american control conference ACC'88*, pp. 2219-2224, 1988.
- [50] H. Noura, D.Sauter., C. Aubrun, "A fault detection and accommodation method applied to an inverted pendulum.," *proc of the 3rd IEEE conference on control applications*, pp. 1397-1401, 1994.
- [51] Y. Zhang, J. Jiang, "An interacting multiple-model based fault detection, diagnosis and fault-tolerant control approach," *In Proc. of the IEEE conference on decision and control CDC'99*, pp. 3593-3598, 1999.